Canadian Space Agency | Agence spatiale canadienne

CSA ASC

Évaluation des programmes de missions d'astronomie spatiale et de missions planétaires

Pour la période du 1er avril 2011 au 31 mars 2016

Projet nº 16/17 02 - 02

Préparée par la Direction, Audit et évaluation

Mars 2018

Canada

Table des matières

Liste des tableaux et des figures iv

Abréviations utilisées v

Résumé v

Pertinence vi
Efficacité vii
Efficience viii

1 Introduction 2

2 Contexte 2

2.1 Portrait du programme 2
2.2 Théorie du changement relative aux programmes 3
2.3 Gouvernance, rôles et responsabilités 6
2.4 Principaux intervenants 7
2.5 Affectation des ressources 7
2.6 Évaluation précédente du programme 9

3 Approche et méthodes d'évaluation 9

3.1 Objet et portée 9
3.2 Questions et enjeux de l'évaluation 9
3.3 Méthodes 10
3.3.1 Examen de la documentation 10
3.3.2 Entrevues avec les informateurs clés 10
3.3.3 Enquête en ligne 11
3.3.4 Études de cas 11
3.4 Limites 11

4 Constatations 11

4.1 Pertinence 11
4.1.1 Harmonisation avec les priorités du gouvernement fédéral 12
4.1.2 Alignement sur les priorités de l'Agence spatiale canadienne 14
4.1.3 Alignement sur les rôles et les responsabilités du fédéral 15
4.1.4 Besoin continu du programme 16
4.2 Efficacité 18
4.2.1 Extrants 19
4.2.2 Objectifs immédiats 25
4.2.3 Objectifs intermédiaires 29
4.2.4 Objectifs ultimes 33
4.3 Efficience 37

5 Conclusions et recommandation 43
5.1 Pertinence 43
5.2 Efficacité et efficience 43
6 Réponse de la haute direction et plan d'action 47
Annexes 48
Annexe A : Modèle logique pour les MAS et les MP 48
Annexe B : Études de cas 49
Annexe C : Références 63

Liste des tableaux et des figures

Tableau 1 : Ressources affectées aux programmes de MAS et de MP pendant la période couverte par l'évaluation 8

Tableau 2 : Frais généraux annuels des MAS de 2011 à 2016 41

Tableau 3 : Frais généraux annuels des MP de 2011 à 2016 42

Tableau 4 : Frais généraux annuels intégrés des MAS et MP de 2011 à 2016 42

Figure 1 : Phases du cycle de vie des MAS et des MP de 2011 à 2016 21

Figure 2 : MAS — Dépenses prévues et réelles, en 1000 $ de 2011 à 2016 39

Figure 3 : MP — Dépenses prévues et réelles, en 1000 $ de 2011 à 2016 40

Figure 4 : Distribution des dépenses totales, en 1000 $ de 2011 à 2016 41

Abréviations utilisées

APXS	Spectromètre à rayons X à particules alpha
ASC	Agence spatiale canadienne
CAMS	Système canadien de métrologie du satellite ASTRO-H
CNRC	Conseil national de recherches du Canada
CP	Chercheur principal
CRSNG	Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada
ASE	Agence spatiale européenne
ETP	Équivalent temps plein
F et E	Fonctionnement et entretien
FGS	Détecteur de guidage de précision
GTO	Observation en temps garanti
HFI	Instrument à haute fréquence
HIFI	Instrument hétérodyne pour l'observation dans l'infrarouge lointain
JAXA	Agence d'exploration aérospatiale japonaise
JWST	Télescope spatial James-Webb
LFI	Instrument à basse fréquence
LiDAR	Détection et télémétrie par ondes lumineuses
MATMOS	Spectromètre par occultation de détection de molécules à l'état de trace dans l'atmosphère martienne
MDA	MacDonald, Dettwiler et associés
MAS et MP	Missions d'astronomie spatiale et missions planétaires
MSL	Mars Science Lab
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NIRISS	Imageur dans le proche infrarouge et spectrographe sans fente
OLA	Altimètre laser OSIRIS-REx
PHQ	Personnes hautement qualifiées
S et C	Subventions et contributions
SPIRE	Récepteur d'imagerie spectrale et photométrique
SSP	Sous-sous-programmes
UVIT	Télescopes d'imagerie dans l'ultraviolet

Résumé

L'évaluation des programmes de missions d'astronomie spatiale (MAS) et de missions planétaires (MP) de l'Agence spatiale canadienne (ASC) a été commandée en décembre 2016 par la Direction, Audit et

évaluation, conformément aux exigences de la *Loi sur la gestion des finances publiques* et au plan d'évaluation ministériel quinquennal. Menée par Science-Metrix Inc. l'évaluation a été réalisée en conformité avec la *Politique sur les résultats* (2016) du Conseil du Trésor du Canada et a porté sur les questions de la pertinence, de l'efficacité et de l'efficience. Le présent rapport constitue la première évaluation des programmes de MAS et de MP. L'évaluation a couvert la période du 1er avril 2011 au 31 mars 2016, pendant laquelle le total des dépenses s'est élevé à plus de 110 millions de dollars.

L'ASC effectue des activités visant la participation du Canada en astronomie spatiale depuis 1989 et en missions planétaires depuis 1999. Les MAS englobent la définition, la conception, le développement technologique, la mise en œuvre et l'utilisation des systèmes complets de télescopes spatiaux canadiens ainsi que la fourniture d'instruments, de capteurs et de sous-systèmes canadiens à des missions internationales de sondes ou de télescopes spatiaux. Elles produisent des données scientifiques sur l'Univers grâce à l'observation du Système solaire et de l'espace lointain. Les MP englobent la définition, la conception, le développement technologique, la mise en œuvre et l'utilisation de technologies emblématiques et d'instruments scientifiques canadiens d'exploration mis à la disposition de missions internationales d'exploration. Elles soutiennent l'exploration robotisée de corps célestes éloignés, tels que des planètes et des astéroïdes, pour mener des observations et des études scientifiques précises.

Pour réaliser cette évaluation, nous avons adopté une approche participative qui comporte l'utilisation mixte de méthodes quantitatives et qualitatives. Plus précisément, nous avons examiné des données de documents et d'archives, et administré une enquête en ligne auprès de 41 bénéficiaires de financement et mené des entrevues avec des informateurs clés : 24 représentants de l'ASC, un représentant d'un autre ministère et trois représentants de partenaires internationaux. Nous avons réalisé deux études de cas, une pour chacun des deux programmes soumis à l'évaluation. Ces études de cas portaient principalement sur la contribution du Canada à la mission de télescope spatial James-Webb (JWST) et à la mission du Mars Science Lab (MSL) de l'éclaireur Curiosity-de la NASA.

Dans l'ensemble, les programmes de MAS et de MP demeurent pertinents et répondent toujours aux besoins de la communauté scientifique canadienne. Grâce à des investissements relativement modestes, les programmes de MAS et de MP ont permis d'obtenir l'accès à une infrastructure de missions spatiales, comme le JWST et le MSL, que le Canada ne pouvait se procurer seul. En échange de ces investissements relativement modestes, nous avons obtenu des avantages sur le plan scientifique, culturel et économique pour les Canadiens. C'est également grâce à ce programme que l'on a mis au point le télescope MOST (Microvariabilité et oscillations stellaires), la première mission d'astronomie spatiale dirigée par l'ASC de l'histoire du programme spatial du Canada.

Pertinence

Les programmes de MAS et de MP sont en conformité avec le programme d'innovation du gouvernement ainsi qu'avec le mandat et l'objectif stratégique de l'ASC. Les programmes de MAS et de MP sont essentiels à la rétention d'un groupe d'astronomes et de planétologues de calibre mondial déterminés à enrichir par la recherche scientifique les connaissances de l'espace au Canada. Les missions d'astronomie spatiale et

les missions planétaires en cours — dans leur phase développementale et opérationnelle — continueront de répondre aux besoins de leur communauté scientifique en leur donnant des occasions de mener de la recherche en exploration spatiale, d'avoir accès à des données scientifiques et de contribuer à l'avancement des connaissances pendant plusieurs années. L'évaluation a révélé que les programmes de MAS et de MP sont très utiles au mandat et à l'objectif stratégique de l'ASC, car ils développent les capacités canadiennes d'exploration spatiale visant le progrès des connaissances sur l'espace grâce à la recherche scientifique et à l'innovation technologique. De plus, l'ASC est la seule organisation fédérale qui offre à la communauté scientifique l'accès à des occasions de recherche et à des données en astronomie spatiale.

Efficacité

Les programmes de MAS et de MP sont très rentables et ont permis des réalisations notables qui ont contribué à la bonne réputation du Canada au sein de la communauté internationale de l'exploration spatiale. La participation du Canada à des missions spatiales de partenaires internationaux est conditionnelle à une contribution sous forme d'un instrument de recherche scientifique, d'un sous-système ou d'une composante connexe. Les missions d'astronomie spatiale et missions planétaires, comme la mission MOST dirigée par le Canada et mission à laquelle il a le plus souvent contribué, ont porté sur un ou plusieurs instruments de recherche scientifique ou sous-systèmes. Tout au long de la période visée par l'évaluation, les programmes de MAS et de MP ont construit ou opéré six instruments de recherche scientifique et quatre sous-systèmes ou engins spatiaux. D'ici 2019, les MAS et les MP atteindront ou dépasseront leurs objectifs grâce à deux instruments de recherche scientifique destinés aux missions d'astronomie spatiale et aux missions planétaires, qui fourniront régulièrement des données à la communauté scientifique canadienne. L'évaluation a révélé que, parfois, la participation des équipes scientifiques a été retardée en raison d'un manque de subvention au démarrage et de la fragmentation du financement pour la recherche scientifique pendant et après les missions. **Le programme devrait élaborer des lignes directrices qui clarifieraient la définition et la portée du soutien scientifique aux missions afin d'assurer la continuité du financement du soutien scientifique à toutes les phases d'une mission, de la phase de prédéfinition aux activités post-opération.**

Le succès du Canada dans les missions d'exploration spatiale est tributaire de la collaboration entre l'industrie, le milieu universitaire et le gouvernement. Les objectifs importants atteints lors des missions de JWST et de MSL, dans le cadre desquelles le gouvernement, le milieu universitaire et des partenaires de l'industrie spatiale ont collaboré pour offrir des instruments scientifiques de haute performance (NIRISS, APXS) et des sous-systèmes essentiels (FGS), ne sont que quelques exemples de la manière dont le profil et la réputation internationale du Canada ont été renforcés à chaque réalisation d'une mission achevée avec succès. Ces résultats ont également fait en sorte que le secteur canadien de l'exploration spatiale est mieux placé pour saisir les occasions de participer à des missions spatiales et réutiliser son savoir-faire et sa technologie dans de futures missions spatiales qui produiront des découvertes scientifiques.

Les constatations de l'évaluation sont sans équivoque quant à la contribution positive des MAS et des MP au profil et à la réputation du secteur canadien de l'exploration spatiale. La combinaison de technologies éprouvées dans l'espace, de savoir-faire en recherche scientifique et en génie, et d'attitude positive est une caractéristique souvent remarquée du secteur canadien de l'exploration spatiale. Reconnue en tant que partenaire fiable de la NASA, l'ASC et ses partenaires ont pu forger de nouveaux partenariats et réaliser des missions d'astronomie spatiale et des missions planétaires avec les agences spatiales de plus en plus actives de plusieurs autres pays, dont le Japon et l'Inde, et exporter dans d'autres pays les technologies et les instruments scientifiques éprouvés. Toutefois, l'évaluation a également révélé que le rythme irrégulier de l'exécution des programmes de MAS et de MP a engendré des défis pour la gestion des ressources humaines et financières des partenaires de l'industrie et chercheurs universitaires, ainsi qu'à un climat d'incertitude chez les partenaires internationaux en ce qui concerne la participation financière du Canada aux missions en cours et aux missions proposées. Avec le temps, le manque d'investissements a pu entacher la réputation enviable du Canada établie depuis plusieurs années par ses contributions emblématiques à des coentreprises internationales et à des missions d'exploration spatiale très médiatisées.

Efficience

L'évaluation a révélé que le programme était très efficient sur le plan de l'effet de levier et des économies. Il en est résulté un accès continu aux données pour la communauté scientifique canadienne et l'élargissement de ses compétences, deux objectifs atteints à un coût très raisonnable pour le gouvernement du Canada, si on le compare aux coûts globaux des missions des partenaires étrangers. En échange de ces investissements relativement modestes, nous obtenons de nombreux avantages sur les plans scientifique, culturel et même économique. Les communautés canadiennes des sciences astronomiques et planétaires peuvent influencer l'orientation de la recherche spatiale, concevoir et réaliser leurs propres instruments scientifiques, recevoir du temps d'observation garanti et un accès prioritaire aux données de recherche pendant au moins six mois. Ces avantages ne sont pas négligeables et servent à maintenir la position d'influence du Canada parmi les chefs de file dans la recherche en exploration spatiale, ce qui est une source de fierté et d'inspiration permettant d'attirer et de retenir les employés hautement qualifiés en sciences, en technologie, en génie et en mathématiques, disciplines qui sont essentielles à une économie canadienne novatrice et productive.

1 Introduction

Le mandat de l'Agence spatiale canadienne (ASC) est « de promouvoir l'exploitation et l'usage pacifiques de l'espace, de faire progresser la connaissance de l'espace au moyen de la science et de faire en sorte que les Canadiens tirent profit des sciences et techniques spatiales sur les plans tant social qu'économique »[1]. Créée en mars 1989 et ayant un statut équivalant à celui d'un ministère, l'ASC est responsable de la coordination et de la mise en œuvre de politiques et de programmes spatiaux, de l'application et de la diffusion de la technologie spatiale, ainsi que de la promotion de l'exploitation commerciale de l'espace.

La Direction, Audit et évaluation de l'ASC a retenu les services de Science-Metrix pour réaliser une évaluation des programmes de missions d'astronomie spatiale (MAS) et de missions planétaires (MP) de l'ASC, conformément au plan d'évaluation ministériel quinquennal et à la P*olitique sur les résultats* (2016) du Conseil du Trésor du Canada[2]. L'évaluation a été effectuée pendant l'exercice financier 2017-2018 sous la gouverne de la Direction, Audit et évaluation (plus précisément, la fonction d'évaluation de l'ASC) de l'ASC et vise la période s'étant écoulée du 1er avril 2011 au 31 mars 2016.

2 Contexte

2.1 Portrait du programme

L'ASC exerce ses activités conçues pour la participation canadienne aux missions en astronomie spatiale depuis 1989 et aux missions planétaires depuis 1999. Après la restructuration de l'ASC en 2010-2011 et la mise en œuvre de l'Architecture d'alignement des programmes de l'ASC en 2011-2012, les programmes de MAS et de MP ont respectivement été définis comme les sous-sous-programmes (SSP) 1.2.2.1 et 1.2.2.2 qui relèvent tous deux du sous-programme 1.2.2, Missions et technologies d'exploration, lequel relève à son tour du programme 1.2, Programme d'exploration spatiale, de l'ASC. Par souci de concision, nous désignerons les deux sous-sous-programmes par le terme « programmes » dans l'ensemble du présent rapport d'évaluation.

Les missions d'astronomie spatiale (SSP 1.2.2.1) englobent la définition, la conception, le développement technologique, la mise en œuvre et l'utilisation des systèmes complets de télescopes spatiaux canadiens, ainsi que la fourniture d'instruments, de capteurs et de sous-systèmes canadiens à des missions internationales de sondes ou de télescopes spatiaux. Ce programme produit des données scientifiques sur l'Univers grâce à l'observation du Système solaire et de l'espace lointain[3].

Les missions planétaires (SSP 1.2.2.2) englobent la définition, la conception, le développement technologique, la mise en œuvre et l'utilisation de technologies emblématiques et d'instruments scientifiques canadiens d'exploration mis à la disposition de missions internationales d'exploration. Ce programme soutient l'exploration robotisée de corps célestes éloignés (planètes, astéroïdes, etc.) afin de mener des observations et des études scientifiques précises[4].

2.2 Théorie du changement relative aux programmes

Le modèle logique des programmes de MAS et de MP présenté à l'annexe A constitue une représentation visuelle des moyens par lesquels les ressources affectées aux programmes servent à produire les principaux résultats, menant à l'atteinte des objectifs prévus. Les contextes suivants, tirés de la Stratégie de mesure du rendement[5] des programmes de MAS et MP, décrivent ces objectifs prévus des programmes ainsi que la théorie du changement relative aux programmes.

Les programmes de MAS et de MP visent quatre **objectifs immédiats** :

1. *Accès continu aux données scientifiques* (objectif 1) : Les études et les instruments scientifiques des domaines de l'astronomie spatiale et de l'exploration planétaire produisent des données scientifiques sur le Système solaire, notre galaxie et l'Univers. Afin de maximiser les retombées, à plus long terme, les données sont mises à la disposition des chercheurs canadiens grâce au traitement des données et à l'accès aux données archivées ou aux échantillons traités. Cet objectif immédiat mène à l'enrichissement des connaissances sur l'Univers, le Système solaire et la capacité des humains à vivre dans l'espace (objectif 7).
2. *Nombre accru de personnes hautement qualifiées* (objectif 2) : Les programmes de MAS et de MP offrent la possibilité à des personnes et à des organisations des secteurs privés et universitaires de faire la démonstration de leurs capacités. Les missions d'astronomie spatiale et les missions planétaires créent des occasions d'activités professionnelles en vue de perfectionner les employés hautement qualifiés et d'embaucher des personnes hautement qualifiées, au Canada, parfois par la participation à des missions internationales. Par conséquent, le nombre de personnes hautement qualifiées en astronomie spatiale et en exploration planétaire au Canada s'est accru. Pour les recenser, nous utilisons la définition trouvée dans le rapport intitulé *État du secteur spatial canadien* laquelle nécessite le suivi du nombre d'ingénieurs, de scientifiques et de techniciens employés[6]. Dans ce cas, les personnes hautement qualifiées seront spécifiquement affectées aux missions d'astronomie spatiale et aux missions planétaires. Cet objectif immédiat fait en sorte que le secteur canadien de l'exploration spatiale est mieux placé pour saisir les occasions de missions spatiales (objectif 5) et faire progresser l'état des connaissances sur l'Univers, le Système solaire et la capacité humaine de vivre dans l'espace (objectif 7).
3. *Présence canadienne élargie dans l'espace grâce à des missions spatiales* (objectif 3) : Pour cet objectif, nous utilisons l'expression « présence dans l'espace » de manière inclusive. Elle couvre les activités en orbite basse terrestre jusqu'au voyage d'instruments (sondes) vers des corps du Système solaire, la réalisation d'études scientifiques et l'utilisation d'instruments scientifiques, ainsi que des sous-systèmes et des engins spatiaux. Parmi les exemples de la présence accrue du Canada dans l'espace pour le programme MP, nous notons l'éclaireur *Curiosity* de la mission Mars Science Laboratory (MSL) qui transporte un instrument scientifique canadien (le spectromètre à rayons X à particules alpha) et l'éclaireur ExoMars, qui transportera deux contributions canadiennes aux sous-systèmes (le Bogie Electromechanical Assembly et des caméras de navigation). Pour le programme des missions d'astronomie spatiale, citons par exemple le télescope d'exploration spectroscopique dans l'ultraviolet lointain (FUSE), lequel a fait

fonctionner le système de caméras de pointage fin construit au Canada pour stabiliser et pointer avec une très grande précision.

Étant donné l'importance réduite du Programme d'exploration spatiale de l'ASC relativement aux programmes d'autres pays, l'option privilégiée du Canada est de créer des partenariats avec d'autres agences spatiales. Pour veiller à ce que de telles missions contribuent à l'atteinte d'objectifs désirés par le gouvernement du Canada, les programmes de MAS et de MP collaborent avec le secteur canadien de l'exploration spatiale en vue de contribuer aux études scientifiques, aux instruments et aux sous-systèmes scientifiques, ainsi qu'aux engins spatiaux. Après avoir démontré sa capacité par l'exécution de missions d'astronomie spatiale ou de missions planétaires, une entité du secteur spatial est mieux placée pour saisir les occasions de participer à une mission nationale ou internationale lorsqu'elle survient, ou pour transférer la technologie et le savoir-faire. Cet objectif immédiat mène au transfert du savoir-faire et de la technologie vers d'autres applications (objectif 5) et à d'autres occasions à saisir dans le domaine spatial (objectif 6).

4. *Compétences accrues du secteur spatial dans les domaines de l'exploration spatiale* (objectif 4) : Les compétences dans les missions d'astronomie spatiale ou les missions d'exploration planétaire sont élargies et actualisées par le milieu industriel ou universitaire au Canada. Ces compétences englobent des champs tels que l'analyse des données provenant de l'espace, la conception de missions et la mise au point ou l'utilisation d'instruments et de sous-systèmes scientifiques ou d'engins spatiaux. Les compétences relatives à la production d'engins spatiaux placent le secteur canadien de l'exploration spatiale, l'industrie et le milieu universitaire dans une position propice à la production d'éléments de propriété intellectuelle, comme des marques de commerce déposées, des brevets, des droits de reproduction enregistrés ou des dessins industriels. Cet objectif peut se traduire par le transfert de savoir-faire et de technologie vers d'autres applications ou à d'autres occasions du domaine spatial (objectifs 5 et 6).

Les programmes de MAS et ds MP visent trois **objectifs intermédiaires :**

1. *Le secteur canadien de l'exploration spatiale est mieux positionné pour saisir les occasions de participer à des missions spatiales* (objectif 5) : pour cet objectif, les occasions de participer à des missions spatiales renvoient aux efforts canadiens en astronomie spatiale ou en exploration planétaire, ainsi qu'aux missions internationales auxquelles participent régulièrement des agences spatiales étrangères. La démonstration de l'expérience dans le milieu spatial est recherchée par les agences spatiales étrangères. Comme les milieux industriels et universitaires ont produit des engins spatiaux, des sous-systèmes et des instruments, ou comme les personnes hautement qualifiées ont travaillé avec des données spatiales, ils sont mieux positionnés pour saisir les occasions qui se présentent dans les missions d'astronomie spatiale ou les missions planétaires. Cet objectif mène à une croissance économique durable (objectif 8) et au rehaussement du profil de l'exploration spatiale au Canada et à l'étranger (objectif 9).
2. *Transfert amélioré du savoir-faire et de technologies à d'autres applications* (objectif 6) : Le degré élevé d'ingéniosité dans la mise au point et l'utilisation d'engins spatiaux, de sous-systèmes et

d'instruments scientifiques qui permettent aux machines et aux humains de fonctionner dans l'espace engendre un savoir-faire novateur (expertise, processus) et une technologie novatrice qui sont souvent appliqués à d'autres fins, soit dans l'espace ou sur Terre. La technologie peut être transférée vers un autre dispositif spatial ou être adaptée et transférée à un dispositif qui sera utilisé sur Terre. Le travail sur des technologies spatiales novatrices accroît la probabilité de trouver d'autres applications. Cet objectif contribue à la croissance économique (objectif 8) et au rehaussement du profil d'exploration spatiale (objectif 9).

3. *Connaissances accrues sur l'Univers, le Système solaire et la capacité humaine de vivre dans l'espace* (objectif 7) : En utilisant les technologies de pointe pour réaliser des missions spatiales et en saisissant les occasions, nous repoussons, grâce aux études scientifiques préalables résultantes, les limites de nos connaissances sur l'Univers et le Système solaire. Les programmes de MAS et de MP contribuent aux découvertes sur la nature et l'origine de l'Univers et du Système solaire, et sur la capacité des humains de vivre et de travailler dans l'espace. Cet objectif mène à l'objectif 9, un profil d'exploration spatiale rehaussé au Canada et à l'étranger.

Les programmes de MAS et de MP visent deux **objectifs finaux :**

1. *Croissance économique durable* (objectif 8) : Si, en raison de leur expertise dans la production d'engins spatiaux et de sous-systèmes, les milieux industriels et universitaires du secteur canadien de l'exploration spatiale sont mieux positionnés pour saisir des occasions, ils peuvent engendrer d'autres activités. Les milieux industriels et universitaires sont donc bien placés pour obtenir davantage de contrats, à l'échelle nationale ou internationale.
   Certaines des technologies ou certains des produits d'abord transférés vers de nouvelles applications, à petite échelle, pourraient se révéler si utiles qu'ils deviendraient commercialement viables et contribueraient largement à l'économie canadienne. Les agences spatiales d'autres pays ont colligé de nombreux exemples de produits, de technologies et de procédés créés pour l'exploration spatiale qui furent adaptés pour produire des produits de consommation et des services non liés au secteur spatial. L'objectif 5 contribue à cet objectif final, car, à mesure que des occasions sont saisies, de nouvelles voies s'ouvrent à de nouveaux participants pour faire croître la sphère économique. Le transfert du savoir-faire et de la technologie vers d'autres applications (objectif 6) contribue également à cet objectif final, car les adaptations d'une utilisation spatiale à une utilisation non spatiale (nouveaux produits de consommation) contribuent à la création d'emplois dans le secteur industriel et le milieu universitaire et favorisent la croissance économique en général.
2. *Profil rehaussé en exploration spatiale au Canada et à l'étranger* (objectif 9) : Dans le contexte de cet objectif final, le profil de l'exploration spatiale comporte trois grands volets : 1) la participation des citoyens, 2) les résultats scientifiques et 3) les impacts géopolitiques (collaborations et partenariats bilatéraux et multilatéraux avec d'autres pays).

Il est généralement admis que l'exploration spatiale -- plus particulièrement l'astronomie spatiale et l'exploration planétaire — a la capacité d'inspirer les citoyens en leur ouvrant de nouveaux horizons, au sens littéral et figuré. Une façon d'y parvenir consiste à vulgariser les connaissances acquises grâce aux

études scientifiques. Ces connaissances qui ont été publiées dans d'importantes revues scientifiques (objectif 7) seront vulgarisées dans des revues populaires et d'autres médias accessibles à un public élargi. Les merveilles révélées par l'exploration, grâce entre autres à la présence canadienne dans l'espace dans le cadre de missions spatiales (objectif 3), peuvent piquer la curiosité des Canadiens et les amener à chercher à en apprendre davantage sur l'astronomie ou l'exploration planétaire par la recherche d'information des articles de journaux, pages Internet ou médias sociaux. Le rehaussement du profil au Canada découle de la réaction des Canadiens aux différentes activités ou missions spatiales au cours desquelles le bon comportement des sous-systèmes ou des instruments fonctionnels fournis par le Canada illustre la compétence canadienne (objectif 4).

Le profil de l'exploration spatiale peut être rehaussé par les résultats scientifiques (objectifs 1, 2 et 7) obtenus par des éclaireurs planétaires, des télescopes spatiaux ou d'autres instruments scientifiques. Bien que par rapport à d'autres pays, le financement canadien de la recherche en matière d'exploration soit modeste, ces mêmes pays et leurs agences spatiales sollicitent l'expertise de calibre mondiale du Canada. La qualité des résultats scientifiques canadiens est établie par des organisations de premier plan (comme l'Organisation de coopération et de développement économiques) qui mentionnent les données et l'information. Au palier international, la perception de la recherche canadienne dans les missions d'astronomie spatiale et les missions planétaires rehausse le profil de l'exploration spatiale.

Le profil de l'exploration spatiale peut être également rehaussé par la reconnaissance que la coopération internationale est très souvent nécessaire en raison des coûts élevés de leur entreprise commune. Cette coopération scientifique ou technologique (objectifs 5, 6 et 7) ne s'établit pas uniquement entre agences, mais nécessite également la participation des gouvernements. La Station spatiale internationale est un bon exemple de cette coopération entre gouvernements. Plus précisément, la contribution canadienne au télescope spatial James-Webb ou à l'éclaireur Curiosity a nécessité l'encadrement de la coopération entre des entreprises et des universités, encadrée par des ententes gouvernementales. La participation aux missions internationales d'astronomie spatiale et aux missions planétaires pourrait contribuer à positionner le Canada comme un partenaire fiable qui enrichit les relations internationales sur de nombreux fronts et à diffuser l'image de marque du Canada comme un pays novateur, ouvert sur l'avenir. Par conséquent, les objectifs relatifs aux missions d'astronomie spatiale et aux missions planétaires (objectifs 3, 5, 6 et 7) concordent bien avec le rehaussement du profil du Canada à l'échelle nationale et internationale dans les activités de recherche et de génie.

2.3 Gouvernance, rôles et responsabilités

Le directeur général du secteur de l'exploration spatiale relève du président de l'ASC. Il préside le Comité de gestion de l'exploration spatiale afin de s'assurer de la coordination efficace de toutes les ressources financières et humaines dans l'ensemble des sous-programmes sous sa responsabilité. Le directeur du Développement de l'exploration spatiale est tenu de mettre en œuvre les décisions prises par le Comité de gestion de l'exploration spatiale qui relèvent de sa direction, laquelle assure l'exécution des programmes de MAS et de MP. Les gestionnaires respectifs des programmes de MAS et de MP guident leurs employés dans l'exécution et la mise en œuvre des activités de ces programmes.

2.4 Principaux intervenants

Les programmes de MAS et de MP sont exécutés en collaboration avec le Groupe international de coordination de l'exploration spatiale, des agences spatiales étrangères et des organisations du gouvernement du Canada, et en consultation avec la communauté canadienne d'astronomie. Cet effort de collaboration est établi sous forme de contrats, de subventions et contributions (S et C), de protocoles d'entente avec d'autres ministères et d'ententes de partenariats internationaux.

Selon la Stratégie de mesure du rendement des programmes de MAS et de MP[7], les principaux intervenants des programmes sont :

1. des entreprises privées (petites, moyennes ou grandes) participant à l'élaboration de solutions scientifiques et technologiques associées à l'exploration spatiale
2. des établissements postsecondaires, des centres de recherche et des universités participant à la recherche et développement dans le domaine des sciences et des technologies associé à l'exploration spatiale
3. des agences spatiales étrangères, notamment la National Aeronautics and Space Administration (NASA), l'Agence spatiale européenne (ASE), l'Agence d'exploration aérospatiale japonaise (JAXA), l'Organisation indienne de recherche spatiale, ainsi que quelques agences spatiales nationales européennes
4. d'autres ministères ou organismes fédéraux, notamment le Conseil national de recherches du Canada (CNRC), le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), la Fondation canadienne pour l'innovation, Services publics et Approvisionnements Canada et le Secrétariat du Conseil du Trésor du Canada. Bien que le CRSNG et la Fondation canadienne pour l'innovation ne jouent pas directement un rôle dans les missions d'astronomie spatiale et les missions planétaires, ils offrent aux scientifiques canadiens le financement des infrastructures de recherche.

2.5 Affectation des ressources

Le budget annuel des services votés de l'ASC de 300 millions de dollars a d'abord été établi dans le Budget 1999 (215,4 millions en dollars actualisés en 2015), et est maintenant de l'ordre de 260 millions de dollars. Le tableau 1 énumère les ressources humaines et financières totales affectées aux programmes de MAS et de MP, ainsi que les dépenses réelles encourues pendant la période d'évaluation.

Tableau 1 : Ressources affectées aux programmes de MAS et de MP pendant la période couverte par l'évaluation

Type de ressource	2011–2012	2012–2013	2013–2014	2014–2015	2015–2016
ETP[a]					
MAS	17,7	16,7	12	6	6
MP	11,2	9,9	10,6	9,5	9,6
Total	*28,9*	*26,6*	*22,6*	*15,5*	*15,6*
Budget prévu (milliers de dollars)[b, c]					
MAS	18 311	17 094	9 422	11 189	5 942
MP	10 794	23 551	16 959	12 492	5 864
Total	*29 105*	*40 645*	*26 381*	*23 681*	*11 806*
	Total pour 5 ans = 131 618 (MAS = 61 958, MP = 69 660)				
Dépenses réelles (milliers de dollars)					
MAS					
Salaires [c]	2 271	2 153	1 611	987	914
F et E - autres [d]	892	671	743	802	904
F et E - contrats	4 406	5 424	4 699	3 316	1 775
Immobilisations	5 741	6 055	4 391	8 519	3 415
S et C	285	308	318	317	341
Sous-total	*13 595*	*14 611*	*11 761*	*13 942*	*7 348*
MP					
Salaires	1 222	1 091	1 173	1 120	1 117
F et E - autres [d]	154	224	65	59	53
F et E - contrats	2 923	2 946	1 503	1 493	1 278
Immobilisations	236	4 050	15 825	7 356	4 631
S et C	236	175	211	262	263
Sous-total	*4 771*	*8 486*	*18 777*	*10 290*	*7 342*
Total	*18 366*	*23 460*	*30 555*	*24 363*	*14 728*
	Total pour 5 ans = 110 923 (MAS = 61 258, MP = 49 665)				

Remarque : [a] ETP = équivalent temps plein
[b] Conforme aux plans de travail annuels approuvés.
[c] Exclut le régime d'avantages sociaux.
[d] Protocoles d'entente et déplacements.

Source : Direction des finances de l'ASC, 31 mars 2017

2.6 Évaluation précédente du programme

Il s'agit de la première évaluation des programmes de MAS et de MP. La Stratégie de mesure du rendement des programmes de MAS et de MP fut élaborée en mars 2014 et révisée en mars 2016.

3 Approche et méthodes d'évaluation

3.1 Objet et portée

Conformément aux exigences formulées dans la Politique sur les résultats et la Directive sur les résultats, la *Loi sur la gestion des finances publiques* et les évaluations prévues dans le plan d'évaluation ministériel quinquennal de l'ASC, cette évaluation groupée des programmes de MAS et de MP portera sur tous les aspects de ces programmes, soit les activités 1.2.2.1 et 1.2.2.2 de l'Architecture d'alignement des programmes. L'objet de l'évaluation est de recueillir et d'analyser systématiquement les données probantes sur la pertinence, l'efficacité et l'efficience de ces programmes, ainsi que les résultats inattendus pendant la période couverte par l'évaluation, du 1er avril 2011 au 31 mars 2016.

3.2 Questions et enjeux de l'évaluation

Les questions et enjeux de l'évaluation présentés plus bas sont les principaux thèmes de l'évaluation. Les procédures d'entrevue sont développées et adaptées en fonction des informateurs appropriés.

Pertinence

1. Les objectifs des MAS et des MP s'harmonisent-ils avec les priorités du gouvernementales ?
2. Les objectifs des MAS et MP sont-ils alignés avec les objectifs stratégiques ministériels ?
3. Les programmes de MAS et de MP cadrent-ils avec les rôles et responsabilités du gouvernement fédéral ?
4. Les programmes de MAS et de MP répondent-ils toujours à un besoin manifeste ?

Efficacité — Extrants

5. Les études scientifiques ont-elles été facilitées et soutenues ? (extrant 1)
6. Des instruments scientifiques sont-ils en construction ou utilisés dans l'espace ? (extrant 2)
7. Des engins spatiaux ou des sous-systèmes sont-ils en construction ou utilisés dans l'espace ? (extrant 3)

Efficacité — Objectifs

8. A-t-on un accès continu à des données scientifiques ? (objectif 1. immédiat)
9. Le nombre de personnes hautement qualifiées a-t-il augmenté ? (objectif 2, immédiat)
10. Les missions spatiales ont-elles accentué la présence canadienne dans l'espace ? (objectif 3, immédiat)

11. La compétence du secteur spatial dans le domaine de l'exploration spatiale s'est-elle enrichie ? (objectif 4, immédiat)
12. Le secteur canadien de l'exploration spatiale est-il mieux placé pour saisir des occasions dans le domaine spatial ? (objectif 5, immédiat)
13. Le transfert du savoir-faire et de la technologie vers d'autres applications a-t-il augmenté ? (objectif 6, intermédiaire)
14. A-t-on accru nos connaissances de l'Univers, du Système solaire et de la capacité humaine à vivre dans l'espace ? (objectif 7, intermédiaire)
15. Pouvons-nous attribuer une croissance économique soutenue aux programmes ? (objectif 8, final)
16. Est-ce que le profil de l'exploration spatiale a été rehaussé au Canada et à l'étranger ? (objectif 9, final)

Efficience

17. Dans quelle mesure le programme est-il efficace pour obtenir des résultats et atteindre les objectifs ?
18. Dans quelle mesure a-t-on réduit le plus possible l'utilisation de ressources dans la mise en œuvre et l'exécution du programme ?

3.3 Méthodes

3.3.1 Examen de la documentation

Nous avons étudié les documents externes et internes des programmes de MAS et de MP pour en évaluer la pertinence continue. Le rapport sur la mesure du rendement des sous-sous-programmes de MAS et de MP[8] et de nombreux autres documents contiennent des données sur l'obtention des résultats et l'atteinte des objectifs pendant la période visée par l'évaluation. La documentation externe était formée de divers documents stratégiques, de rapports de groupes d'experts, d'évaluations et de propositions de l'industrie, ainsi que des déclarations du gouvernement du Canada sur l'importance de la recherche et développement en sciences, en technologie et en innovation dans le domaine spatial. La documentation interne comptait des rapports sur les plans et les priorités, des rapports ministériels sur le rendement, la Stratégie de mesure du rendement, des données sur le rendement et les dossiers de suivi des médias, les dossiers de données financières, les rapports sommaires sur les invitations reçues de la part de partenaires internationaux et environ 30 dossiers de projets liés aux missions. La majeure partie de la documentation a été téléchargée, codée et analysée par Atlas.ti.

3.3.2 Entrevues avec les informateurs clés

Des entrevues ont été menées en groupe ou individuellement avec des membres du personnel ou de la direction de l'ASC à Saint-Hubert. Nous avons interviewé 24 personnes, dont trois directeurs généraux et le directeur des programmes. Les quatre rencontres planifiées ont été menées avec des représentants de l'Institut Herzberg d'astrophysique du CNRC. Les entrevues par téléphone ont été effectuées avec trois

partenaires internationaux : la NASA, l'ASE et la JAXA. Toutes les entrevues ont été retranscrites, téléchargées, codées et analysées par Atlas.ti.

3.3.3 Enquête en ligne

Nous avons expédié par courriel un questionnaire électronique à 41 personnes ressources. De ces courriels, un s'est révélé non livrable. Des 40 courriels restants, nous avons reçu 19 questionnaires remplis, soit un taux de réponse de 48 %. Sur le plan statistique, les données de l'enquête ne peuvent être jugées fiables en raison de leur marge d'erreur élevée. Néanmoins, des données qualitatives intéressantes, qui témoignent de la manière dont les bénéficiaires de financement perçoivent les programmes de MAS et de MP, ont été recueillies.

3.3.4 Études de cas

Deux études de cas ont été réalisées, une pour chacun des deux programmes visés par l'évaluation. Ces deux études de cas portaient sur la contribution du Canada à la mission JWST et à la mission de l'éclaireur Curiosity du Mars Science Lab de la NASA. Deux entrevues de groupe en personne réunissant six personnes au total ont été menées avec des employés de l'ASC participant à ces missions. Des entrevues par téléphones ont également été réalisées avec le directeur des programmes de la NASA pour la mission JWST, les chercheurs principaux canadiens et un représentant de l'industrie. La documentation liée aux missions et les notes d'entrevues retranscrites ont été téléchargées, codées et analysées par Atlas.ti.

3.4 Limites

Certaines limites sont soulevées des données d'évaluation recueillies. Sans un ensemble de données fiables issues de partenaires internationaux, nous n'avons pu évaluer pleinement l'effet des programmes sur le profil et la visibilité du Canada à l'échelle internationale dans le domaine de l'exploration spatiale. La faible disponibilité de données archivées (dossiers de mesure du rendement des programmes de chaque exercice financier pour la période visée par l'évaluation) et leur qualité ont réduit notre capacité d'évaluer pleinement l'efficacité de la production de résultats et l'efficience dans l'utilisation des ressources.

4 Constatations

4.1 Pertinence

La pertinence des programmes de MAS et de MP a été évaluée en fonction 1) des liens entre les objectifs des programmes et les priorités du gouvernement fédéral, 2) des liens entre les objectifs des programmes et les objectifs stratégiques ministériels, 3) des rôles et responsabilités du gouvernement fédéral dans l'exécution des programmes et 4) de la mesure à laquelle le programme continue de répondre à un besoin manifeste et répond aux besoins des Canadiens.

4.1.1 Harmonisation avec les priorités du gouvernement fédéral

Question n° 1 de l'évaluation (pertinence) : Les objectifs des MAS et des MP s'harmonisent-ils avec les priorités du gouvernementales ?

Constatation n° 1 : Les objectifs des programmes de MAS et de MP sont harmonisés avec le Cadre de la politique spatiale canadienne, les priorités actuelles du gouvernement fédéral pour faire progresser les sciences, la technologie et l'innovation dans le but de stimuler la croissance économique et de favoriser la prospérité, ainsi que les récentes annonces du gouvernement du Canada.

L'innovation comme facteur contributif important à la productivité et à la croissance économique à venir est depuis longtemps admise au Canada par le gouvernement, le milieu universitaire et l'industrie[9,10,11]. L'extrait qui suit, tiré de l'examen en 2011 du soutien fédéral à la recherche et développement par un groupe indépendant désigné par le gouvernement, énonce avec éloquence la manière dont l'innovation contribue à la productivité :

> Dans l'optique de la hausse de la productivité, la diffusion et l'adaptation de l'innovation sont d'une importance capitale, puisque la plupart des innovations qui voient le jour dans une région ou sur un territoire donné découlent de l'adaptation d'innovations importantes réalisées ailleurs. Ainsi, l'adoption ou l'adaptation par une entreprise d'une façon de faire nouvelle ou meilleure est aussi considérée comme une forme d'innovation en entreprise. En fait, c'est la plus courante[12].

Traditionnellement, l'ASC occupe le premier rang du pourcentage de contrats en recherche et développement accordés à des entreprises canadiennes. Selon les estimations de Statistique Canada[13], cette part s'est élevée à 167 millions de dollars, ou 60 % du total, en 2010-2011. Le rôle prépondérant que l'ASC joue sur la scène de l'innovation des entreprises canadiennes a été mis en évidence dans l'*Examen de l'aérospatiale* de 2012. Les recommandations de l'Examen visaient surtout l'amélioration des politiques et des programmes propres au secteur de l'aérospatiale, notamment la création du Conseil consultatif de l'Agence spatiale canadienne et du Comité de gestion des programmes spatiaux, la reconnaissance de l'importance des technologies spatiales et de leur capacité de stimuler la prospérité et la croissance économique, la stabilisation du financement de base et les fonds supplémentaires destinés aux programmes de développement technologique[14].

Publié en février 2014, le Cadre de la politique spatiale du Canada avait pour but d'orienter les activités à venir du programme spatial canadien, dont l'exploration spatiale, et ainsi inspirer les jeunes Canadiens à poursuivre des études et à faire carrière en sciences et en génie. Le gouvernement s'est engagé à :

- s'assurer que le Canada demeure un partenaire recherché dans les missions internationales d'exploration spatiale qui servent les intérêts nationaux du Canada
- continuer d'investir dans le développement de systèmes et d'instruments scientifiques perfectionnés dans le cadre d'initiatives internationales d'envergure
- poursuivre le Programme des astronautes canadiens, afin d'assurer la présence de Canadiens à bord des installations de recherche et des laboratoires spatiaux actuels et à venir[15].

La stratégie de mesure du rendement des missions d'astronomie spatiale (MAS) et des missions planétaires (MP) a été élaborée et approuvée peu après la publication du Cadre de la politique spatiale. La stratégie est axée sur les deux premiers engagements du Cadre, l'accent étant mis sur la collaboration avec les partenaires des agences spatiales à l'étranger et la contribution aux missions internationales conjointes d'exploration spatiale. La stratégie comporte le modèle logique des MAS et MP (annexe A) qui établit les objectifs des programmes en deux séquences logiques alignées sur les engagements du gouvernement à l'égard des sciences, de la technologie et de l'innovation, tel qu' indiqué ci-dessus. La première séquence logique vise l'amélioration du profil d'exploration spatiale du Canada par l'enrichissement des connaissances sur l'Univers et le Système solaire, la formation de personnes hautement qualifiées (PHQ) et l'accès aux données scientifiques à la communauté scientifique. La deuxième est axée sur la stimulation de la croissance économique. Pour y parvenir, il faut transférer le savoir-faire et la technologie à des applications sur Terre et dans l'espace, développer les compétences du secteur canadien de l'exploration spatiale et préparer le secteur canadien de l'exploration spatiale à des occasions spatiales éventuelles en maintenant sa présence dans l'espace grâce aux missions spatiales. Ces deux séquences logiques et leurs objectifs ultimes abordent divers aspects de la Stratégie fédérale des sciences et de la technologie visant l'optimisation des compétences et des connaissances au Canada et la mise en valeur des atouts de notre pays en matière entrepreneuriale[16].

En décembre 2014, le gouvernement du Canada a diffusé la version actualisée de sa stratégie fédérale des sciences, de la technologie et de l'innovation dont l'objectif était de « renforcer la position du Canada en tant que chef de file mondial de la recherche scientifique et de l'innovation »[17] et de continuer « d'appuyer et d'approfondir les travaux de recherche dans un vaste éventail de disciplines, y compris la recherche axée sur l'application et la découverte »[18]. La stratégie reposait sur trois piliers : encourager les jeunes Canadiens à poursuivre des carrières en sciences, en technologie, en génie ou en mathématique, ainsi qu'attirer et retenir les personnes hautement qualifiées constituaient les priorités du pilier des ressources humaines de la stratégie. Soutenir la recherche de calibre mondial pouvant générer des avantages économiques à long terme était la priorité du pilier des connaissances de la stratégie. Encourager les partenariats entre universités et industrie dans le but de stimuler l'innovation et positionner les entreprises canadiennes sur le marché mondial était la priorité du pilier de l'innovation de la stratégie[19]. La stratégie a affirmé l'intention du gouvernement de renforcer la capacité du Canada d'innover dans les sciences et la technologie et de faire de la recherche et développement dans des secteurs où les universités et l'industrie dépendent du soutien du gouvernement, par exemple le secteur de l'exploration spatiale. Les objectifs des Missions d'astronomie spatiale (MAS) et des Missions planétaires (MP) continuent de s'inscrire dans ces priorités d'inspirer les Canadiens et de faire progresser la capacité en sciences spatiales afin que le Canada soit un pays respecté, axé sur l'innovation présent dans l'espace.

En 2015, les lettres de mandat du ministre de l'Innovation, des Sciences et du Développement économique et de la ministre des Sciences indiquaient que le gouvernement avait l'intention d'« établir des partenariats étroits avec les entreprises et les secteurs dans le but d'appuyer les efforts déployés pour accroître la productivité et l'innovation »[20] et de s'assurer que « les investissements en recherche scientifique, ainsi qu'un juste équilibre entre la recherche fondamentale en appui de découvertes et la

commercialisation des idées, mèneront à la création de bons emplois et à une croissance économique durable »[21]. Dans l'ensemble, les programmes de MAS et de MP sont demeurés bien alignés sur les priorités du gouvernement. Cependant, l'adoption de ces priorités, en particulier celles liées au Programme d'exploration spatiale de l'ASC a suscité des inquiétudes chez les membres de l'ASC interviewés, à la lumière des récentes annonces du gouvernement. Il convient de noter que l'étude des documents et des interviews indique que les priorités du gouvernement actuel se retrouvent dans les annonces récentes du financement des vols spatiaux habités et l'exploration spatiale après la Station spatiale internationale, parmi les priorités spatiales concurrentes. De plus, aucune nouvelle mission n'a été approuvée ou financée pour les programmes de MAS et de MP depuis le début de la période couverte par la présente évaluation.

4.1.2 Alignement sur les priorités de l'Agence spatiale canadienne

Question n° 2 de l'évaluation (pertinence) : Les objectifs des MAS et MP sont-ils alignés avec les objectifs stratégiques ministériels ?

Constatation n° 2 : Les objectifs des MAS et des MP sont étroitement alignés au soutien de l'innovation, à la diffusion d'information et à la création de connaissances scientifiques, des éléments faisant partie intégrante des objectifs stratégiques de l'ASC.

L' étude des documents internes, dont les différentes éditions du *Rapport sur les plans et les priorités* et du *Rapport ministériel sur le rendement* couvrant la période d'évaluation, indique que les objectifs stratégiques de l'ASC sont demeurés les mêmes : « les activités du Canada en matière d'exploration spatiale, de prestation de services depuis l'espace et de développement de capacités spatiales, répondent aux besoins nationaux en matière de connaissances scientifiques, d'innovation et d'information »[22, 23].

Les programmes de MAS et de MP facilitent la participation du secteur canadien de l'exploration spatiale, notamment les universités et l'industrie, à des missions d'astronomie et à des missions planétaires le plus souvent parrainées par des agences spatiales partenaires à l'étranger. Ces opportunités, basées sur les forces de l'industrie spatiale et du milieu scientifique canadiens, visent la contribution des technologies et du savoir-faire scientifique précieux du Canada dans la conception, la construction et l'exploitation d'engins, de sous-systèmes ou d'instruments scientifiques spatiaux[24]. Le Canada a démontré son savoir-faire, son expertise et ses innovations de calibre mondial à travers de nombreuses missions internationales d'astronomie et d'exploration planétaire, l'amenant à être un partenaire prisé par les agences spatiales ailleurs dans le monde. Le Canada a mis des années à faire reconnaître les capacités de son secteur de l'exploration spatiale et, grâce à cette reconnaissance, les astronomes et planétologues canadiens ont eu accès à des instruments et des données scientifiques qui ont mené à des découvertes et à de nouvelles connaissances sur le Système solaire et l'Univers[25].

Les programmes de MAS et de MP sont bien alignés avec les objectifs stratégiques de l'ASC et les priorités distinctes énoncées dans le *Rapport sur les plans et les priorités de 2016–2017*, par exemple la « recherche fondamentale et les nouvelles découvertes » et le « positionnement du secteur spatial en vue

d'opportunités internationales »[26]. Les données tirées des entrevues confirment que ces programmes sont étroitement liés au mandat de l'ASC en ce qui concerne « l'avancement des connaissances spatiales grâce aux sciences et technologies »[27]. Il a été reconnu que ces programmes conduisent à de la recherche scientifique, à un accès à des données scientifiques et à un usage facilité d'information pour enrichir les connaissances.

4.1.3 Alignement sur les rôles et les responsabilités du fédéral

Question n° 3 de l'évaluation (pertinence) : Les programmes de MAS et de MP cadrent-ils avec les rôles et responsabilités du gouvernement fédéral ?

Constatation n° 3 : Les programmes de MAS et de MP ont été conçus et mis en œuvre de manière cohérente avec le mandat de l'Agence spatiale canadienne, un mandat unique parmi les ministères et organismes fédéraux, car il vise les missions et les technologies d'exploration spatiale.

Les activités et objectifs des programmes de MAS et de MP cadrent avec les fonctions essentielles attribuées à l'Agence par la *Loi sur l'Agence spatiale canadienne*, notamment « de concevoir, réaliser, diriger et gérer des programmes et travaux liés à des activités scientifiques et industrielles de recherche et développement dans le domaine spatial et à l'application des techniques spatiales », « de promouvoir la diffusion et le transfert des techniques spatiales au profit de l'industrie canadienne » et « d'encourager l'exploitation commerciale du potentiel offert par l'espace, des techniques et installations spatiales et des systèmes spatiaux »[28].

De même, le rapport de l'*Examen de l'aérospatiale* faisait ressortir que :

> La troisième catégorie d'activité spatiale concerne l'exploration et les sciences spatiales, qui visent principalement à satisfaire notre soif et besoin de connaissances fondamentales. Les exploits héroïques d'astronautes, les missions vers la Lune et d'autres planètes, les laboratoires spatiaux et les télescopes pour l'observation de l'espace lointain nous permettent de mieux comprendre l'Univers et la place que nous y occupons. Ils constituent une source de fierté nationale et de prestige, en plus de générer des retombées technologiques et économiques. Ces activités sont presque toujours financées par le gouvernement et, compte tenu de leur envergure et de leur complexité, elles sont généralement menées à bien dans le cadre d'une collaboration internationale[29].

Le rapport de l'*Examen de l'aérospatiale* recommande également au gouvernement « de développer des mécanismes pour appuyer les efforts déployés par les entreprises afin de s'assurer, grâce au perfectionnement continu des compétences, que leur effectif demeure souple et à la fine pointe de la technologie » [30]. Dans de nombreux autres rapports publiés au fil des ans, le gouvernement fédéral est incité à jouer un rôle important pour soutenir la recherche fondamentale et la recherche appliquée et également à former des personnes hautement qualifiées[31, 32, 33]. Par exemple, le mandat du Conseil national de recherches du Canada (CNRC) et celui du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) visent la recherche et le développement de personnes hautement qualifiées[34]. Le CNRC est

chargé de l'astronomie terrestre, mais l'Agence est le seul organisme à offrir à la communauté scientifique l'accès à des opportunités et des données d'astronomie spatiale. Le CRSNG finance la recherche scientifique fondamentale et appliquée et les répondants de l'enquête en ligne l'ont désigné comme étant une autre importante source de financement pour la recherche spatiale, bien qu'il n'y ait aucune coordination avec les missions des MAS et des MP. Seule l'Agence est mandatée de « faire progresser la connaissance de l'espace à travers la science et les technologie » et elle exécute ce travail en coordination avec le Centre canadien de données astronomiques du CNRC avec peu ou pas du tout de duplication de fonctions ou de chevauchement avec les autres ministères.

La recherche, le développement et l'innovation issus des programmes de MAS et de MP s'inscrivent dans le mandat de l'ASC évoqué ci-dessus. Fournir le matériel spatial (instruments, sous-systèmes ou engins spatiaux) exige une infrastructure, des ressources et un savoir-faire spécialisés dont aucun autre ministère ni organisme gouvernemental ne dispose. Les données d'entrevue indiquent aussi que l'ASC est la mieux placée pour développer les grandes compétences technologiques de la main d'œuvre dont nous avons besoin pour le secteur spatial, et former des chercheurs hautement qualifiés pour l'analyse des données scientifiques, afin de remplir son mandat et de contribuer à donner au Canada un avantage concurrentiel.

Toutefois, si l'on sort du cadre de l'évaluation, il convient de noter que le budget de 2017 mentionnait que le gouvernement fédéral avait un rôle important à jouer pour faire avancer la science, la recherche et l'innovation dans le but de bâtir une classe moyenne plus forte et compétente. Dans le domaine de l'exploration spatiale en particulier, la décision du gouvernement d'investir dans une mission vers Mars indique que l'exploration planétaire constitue une priorité. Dans la foulée de cette décision, 80,9 millions de dollars furent alloués à l'ASC dès l'exercice financier 2017–2018 afin « de démontrer et de mettre à profit les innovations spatiales canadiennes » dans le domaine des technologies quantiques et pour soutenir la participation du Canada à la prochaine mission Mars Orbiter de la NASA[35].

4.1.4 Besoin continu du programme

Question n° 4 de l'évaluation (pertinence) : Les programmes de MAS et de MP répondent-ils toujours à un besoin manifeste ?

Constatation n° 4 : Les programmes de MAS et de MP sont essentiels au maintien d'un effectif d'astronomes et de planétologues de classe mondiale au Canada qui se consacrent à l'avancement de la connaissance de l'espace grâce aux découvertes scientifiques. Puisqu'aucune nouvelle mission n'a été approuvée ni financée depuis le début de l'évaluation, l'industrie spatiale canadienne et ses partenaires internationaux ont réussi à trouver d'autres partenaires et à saisir d'autres opportunités d'affaires.

Le Canada est fier de sa longue tradition à titre de nation spatiale. C'est une source de prestige et d'inspiration qui motive les jeunes Canadiens à faire carrière dans les sciences, la technologie, l'ingénierie et les mathématiques. Il est tout à fait naturel qu'une évaluation de la nécessité de maintenir ces programmes doive d'abord se faire du point de vue des communautés scientifiques touchées.

La longue histoire du Canada en astronomie, détaillée dans l'étude de cas sur le télescope spatial James Webb (voir l'annexe B),a vu la communauté canadienne d'astronomie augmenter, allant d'environ 100 membres en 1971 à environ 300 astronomes professionnels et 300 étudiants inscrits aux cycles supérieurs dans les universités à travers tout le Canada. Cette communauté est parmi les plus influentes au monde pour sa contribution aux percées scientifiques en astronomie et en astrophysique. Par contre, la communauté des spécialistes de l'exploration planétaire est relativement jeune, comme en fait foi l'étude de cas sur la mission Mars Science Lab (MSL) (voir l'annexe B). La communauté est passée d'un petit nombre de chercheurs qui faisaient de la recherche fondamentale sans nécessiter un accès à l'espace au tournant du millénaire à un groupe d'environ 26 professeurs occupant des chaires stratégiques dans les meilleures universités canadiennes et qui participent ou ont participé à des équipes scientifiques (comme cochercheurs) de missions d'exploration planétaire.

Parmi les bénéficiaires du financement des programmes de MAS et de MP recensés par l'évaluation travaillant à l'université ou dans l'industrie, 90 % ont déclaré que ces programmes étaient essentiels et devaient être maintenus, soit la note la plus élevée possible. Les répondants ont classé en trois catégories les besoins qu'ils ont recensés, soit :

1. Faire avancer les connaissances en astronomie et en astrophysique en soutenant la mise au point d'instruments scientifiques et de technologies, ce qui a permis aux chercheurs canadiens de prendre part à des missions spatiales internationales, ainsi que de produire des données scientifiques et en faciliter l'accès.
2. Attirer les personnes hautement qualifiées et les étudiants pour la recherche spatiale et améliorer leur formation.
3. Soutenir les entreprises canadiennes qui souhaitent innover, créer et commercialiser des produits et des services de haute technologie.

Les trois principaux arguments ressortis de l'enquête en ligne et des entrevues sur la nécessité de poursuivre le financement des programmes de MAS et de MP se résument comme suit :

1. Il faut poursuivre l'exploration spatiale afin de répondre aux questions fondamentales au sujet des planètes, de notre Système solaire et de la forme et la composition de l'Univers. Les répondants ont également indiqué qu'il faut bien connaître les caractéristiques de la planète Mars et créer de nouvelles technologies pour en faciliter l'exploration et la colonisation. La participation des principaux chercheurs du Canada à l'exploration spatiale contribuerait de façon importante à l'accroissement des connaissances dans ces domaines.
2. Il n'existe actuellement aucune autre source de financement qui pourraient remplacer les programmes de MAS et de MP qui puisse donner accès aux installations, aux missions et aux données scientifiques spatiales essentielles à la conduite d'études scientifiques de calibre mondial et à la formation de personnes hautement qualifiées sans lesquelles les communautés scientifiques respectives du Canada diminueraient. Il convient de noter également que les données tirées de travaux de recherche documentés et d'entrevues montrent qu'au moins cinq personnes hautement qualifiées ont saisi des occasions aux États-Unis et ailleurs, tandis que

d'autres ont exprimé leur intention de les imiter advenant une autre baisse de la possibilité de mener de la recherche scientifique dans leur domaine.

3. Les programmes de MAS et de MP offrent aux entreprises canadiennes l'occasion de développer des technologies de pointe fiables répondant à des besoins spatiaux particulièrement difficiles à combler, ce qui démontre leur capacité d'innovation et améliore leur profil et leur réputation à l'étranger, les rendant plus compétitives dans le marché international de l'espace.

Le rythme irrégulier du financement des programmes de MAS et de MP constitue un défi important pour les chefs de file de l'industrie spatiale, notamment la société MacDonald, Dettwiler and Associates (MDA) de la Colombie-Britannique et la société COM DEV International (COM DEV) de l'Ontario, qui ont récemment trouvé de nouveaux partenaires commerciaux aux États-Unis. Les activités canadiennes et états-uniennes de MDA sont désormais dirigées par une société états-unienne dont le siège social est situé à San Francisco[36]. En novembre 2015, la société états-unienne Honeywell a annoncé l'achat de la gamme du matériel et des systèmes spatiaux de COM DEV International[37]. Ainsi, il ne reste à Cambridge (Ontario) que la gamme des produits d'exploration spatiale.

De même, les agences spatiales partenaires à l'international (p. ex., la NASA et l'ASE) ont trouvé d'autres partenaires en l'absence du soutien du gouvernement du Canada, comme l'illustre l'étude de cas du MSL. Le faible taux de réponse des partenaires internationaux a été révélateur en cette matière, tout comme l'incapacité des répondants de répondre à de nombreuses questions d'entrevue à cause du temps écoulé depuis la dernière mission menée en collaboration, car « ces missions se sont déroulée il y a de nombreuses années ». La participation des scientifiques canadiens aux missions des agences spatiales internationales et leur accès subséquent aux données scientifiques sont en général conditionnels à une contribution de matériel technologique fournie par une entreprise de l'industrie spatiale canadienne et payée par le gouvernement du Canada. L'évaluation a révélé qu'il fallait absolument poursuivre les programmes de MAS et de MP pour maintenir la recherche scientifique de calibre mondial menée par les principaux intervenants de la communauté canadienne de l'astronomie spatiale et de l'exploration planétaire. Grâce à un plan ferme prévoyant l'approbation des missions à venir, ces intervenants continueraient de bénéficier des programmes de MAS et de MP.

4.2 Efficacité

Dans la présente section du rapport, nous présentons les constatations en matière d'évaluation de l'efficacité, c'est-à-dire les résultats obtenus et les objectifs atteints. Dans les sous-sections qui suivent portant sur les résultats, les objectifs immédiats, les objectifs intermédiaires et les objectifs ultimes, nous évaluons dans quelle mesure les programmes de MAS et de MP ont atteint chacun des extrants et des objectifs énoncés dans le modèle logique.

4.2.1 Extrants

Question n° 5 de l'évaluation (efficacité) : Les études scientifiques ont-elles été facilitées et soutenues ?

Constatation n° 5 : Le nombre d'universités et d'instituts de recherche canadiens réalisant des recherches scientifiques grâce à des subventions et des contributions et qui sont encore actives (soutenues par des contrats liés à une mission) est demeuré relativement stable et dépasse les objectifs fixés pour la période évaluée. Le soutien aux recherches scientifiques en cours de conception a diminué de façon marquée. En effet, le nombre d'études a chuté, passant de neuf à cinq dans les missions d'astronomie spatiale et de sept à une dans les missions planétaires, bien que les programmes ont tout de même atteint leur objectif réduit d'une étude pour chacun d'eux.

La facilitation des recherches scientifiques fait référence à l'accroissement des connaissances par les scientifiques participant aux missions spatiales d'astronomie ou de sciences planétaires. Les priorités scientifiques sont établies à partir des possibilités recensées à l'international et grâce à des consultations auprès de la communauté scientifique canadienne. Les propositions sont sollicitées par des appels à la participation et elles sont financées par des subventions accordées aux proposants des universités. On peut utiliser une subvention de projet pour accroître le rendement scientifique d'une mission en exploitant ses données archivées ou pour définir les objectifs scientifiques et les besoins en matière de mesures d'une possibilité précise de participation à une mission. Les appels de propositions contenant des énoncés des travaux bien définis sont publiés et les contrats de financement correspondants sont accordés par un processus concurrentiel. Dans le cadre des activités préparatoires d'un projet pour une mission approuvée, les exigences habituelles incluent une justification pour les possibilités de la mission, une analyse des options, l'évaluation des coûts et la proposition d'un échéancier, et les principes de la conception et les concepts de construction d'instruments scientifiques ou de sous-système. Les recherches scientifiques sont financées pour réaliser du travail pour l'ASC, afin de répondre à des exigences précises dans le cadre de missions d'astronomie spatiale ou de missions planétaires en cours ou prévues[38].

Pendant la période évaluée, les objectifs de deux et six recherches scientifiques menées par des universités canadiennes avaient été respectivement fixés pour les missions d'astronomie spatiale et les missions planétaires. Dans le cas de l'astronomie spatiale, trois universités ont travaillé au sous-système ASTRO-H CAMS, et une autre université à l'instrument SPIRE sur le satellite Herschel pendant les quatre premières années. Une cinquième université a commencé à fournir un appui pour l'instrument UVIT sur ASTROSAT au cours de la dernière année. Le nombre d'universités assurant des services de soutien à l'instrument de l'APXS du MSL a augmenté, passant de deux à quatre au cours de cette période de cinq ans. Par contre, le nombre d'universités fournissant du soutien à l'instrument OLA d'OSIRIS-REx a baissé, passant de quatre à deux au cours des trois dernières années. Deux recherches scientifiques ont pris fin en 2012 après le retrait de la NASA suivi de celui de l'ASC de la mission ExoMARS de l'ASE. Les programmes de MAS et de MP ont tous deux dépassé leur objectif du nombre de recherches scientifiques subventionnées réalisées pendant la période évaluée[39].

Au cours de la période d'évaluation un objectif d'une recherche scientifique en développement, soutenue par des contrats a été fixé pour chacun des programmes de MAS et MP. Étant donné le nombre de missions à l'étude (p. ex., EUCLID, SPICA) ou en développement (p. ex., JWST – FGS et NIRISS, NEOSSat, UVIT sur ASTROSAT et ASTRO-H CAMS) au départ, l'objectif pour l'astronomie spatiale a été largement dépassé. Par contre, l'objectif des missions planétaires n'a été dépassé qu'au cours des deux premières années, alors que les missions Mars 2020 et ExoMARS étaient envisagées, tandis que le spectromètre APXS du MSL était en construction. La réalisation de l'instrument OLA d'OSIRIS-REx a été lancée en 2013-2014 et, depuis, il s'agit de la seule étude scientifique en cours dans le cadre de ce programme. Au cours de la période évaluée, le nombre d'universités, de centres de recherche et d'entreprises privées participantes a chuté, passant de neuf à cinq dans le cas de l'astronomie spatiale et de sept à un pour les missions planétaires[40].

Question n° 6 de l'évaluation (efficacité) : Des instruments scientifiques sont-ils en construction ou opérés dans l'espace ?

Constatation n° 6 : Les instruments scientifiques du Canada destinés aux missions Planck et Herschel de l'ASE, ainsi que le télescope spatial MOST du Canada ont été en service jusqu'en 2013, suivis de l'instrument UVIT sur ASTROSAT, entré en service en 2014–2015. L'APXS construit par le Canada et embarqué sur le MSL de la NASA est en service depuis 2012, tandis que le NIRISS du JWST et l'OLA d'OSIRIS-REx sont en cours de réalisation. D'ici 2019, les MAS et les MP respecteront leurs objectifs ou les dépasseront, chacun ayant à son actif, deux instruments scientifiques qui livreront périodiquement des données à la communauté scientifique canadienne.

Question n° 7 de l'évaluation (efficacité) : Des engins ou des sous-systèmes spatiaux sont-ils en construction ou opérés dans l'espace ?

Constatation n° 7 : Lancé en 2003, le télescope spatial MOST était le seul engin spatial canadien en service pendant la période évaluée, tandis que NEOSSat, le sous-système CAMS d'ASTRO-H et le sous-système FGS du JWST étaient en construction. Lancé en février 2016, ASTRO-H a été déclaré perdu en avril 2016. De petits télescopes spatiaux et microsatellites furent conçus et mis en orbite à un coût raisonnable. La mission de collecte de données scientifiques qui leur fut confiée était hautement spécialisée.

En échange de sa participation aux missions spatiales réalisées avec les partenaires internationaux, le Canada doit verser une contribution sous forme d'instrument scientifique, de sous-système ou de composante connexe. L'agence spatiale qui parraine le projet précise généralement les exigences scientifiques ou technologiques dans les invitations ouvertes et officielles à participer aux missions internationales. Le Canada reçoit parfois une invitation ciblée si le secteur spatial canadien est réputé pour sa capacité à fournir certaines technologies précises. Par exemple, comme le décrit l'étude de cas du JWST, la NASA a demandé au Canada de contribuer à un sous-système essentiel à la mission, soit une caméra infrarouge syntonisable qui permettra au télescope de viser précisément un point du ciel. D'après les données des entrevues, la technologie et la capacité éprouvée de COM DEV ont été cruciales pour l'invitation et l'attribution du contrat et ont facilité les négociations de l'ASC avec la NASA sur l'instrument

scientifique servant de contribution au JWST, lequel produira des données au profit des astronomes et des astrophysiciens canadiens.

L'ASC a dirigé deux missions d'astronomie spatiale depuis la création du programme spatial canadien : MOST et NEOSSat. Le plus souvent, l'ASC a fourni des instruments scientifiques ou des sous-systèmes comme contribution aux missions d'astronomie spatiale ou missions planétaires des autres agences spatiales. La figure 1 montre les missions actives, passées et à venir en fonction de la phase de leur cycle de vie utile pendant la période évaluée. La figure est suivie de brèves descriptions des missions, des instruments scientifiques et des sous-systèmes, constituées à partir de la documentation interne disponible et de recherches internet.

Figure 1 : Phases du cycle de vie des MAS et des MP de 2011 à 2016

Source : Étude de documents et de dossiers internes.

Instruments canadiens

Planck — HFI/LFI

Cette mission de l'ASE a été lancée en 2009 avec l'observatoire spatial Herschel et s'est terminée en 2013. La mission Planck avait pour but d'étudier les anisotropies et la polarisation du rayonnement de fond cosmique afin d'explorer la naissance de l'Univers, son évolution et les formes qu'il pourrait prendre avec le temps. Deux instruments étaient à bord de l'observatoire Planck : un instrument à haute fréquence (HFI) et un instrument à basse fréquence (LFI). L'ASC a financé un logiciel d'analyse rapide et de détection

des tendances et a assuré le soutien scientifique des deux instruments, ainsi que le traitement des données et le soutien post opérationnel jusqu'en 2016.

Herschel — HIFI/SPIRE

Lancé en 2009 avec la mission Planck, l'observatoire spatial Herschel a fonctionné et transmis des données jusqu'à la fin prévue de la mission en 2013. Herschel était une mission de l'Agence spatiale européenne (ASE) en partenariat avec l'ASC. Herschel était le plus grand télescope spatial jamais mis en orbite. Il était doté de trois instruments scientifiques d'analyse de l'infrarouge et du rayonnement sous-millimétrique provenant des confins de l'Univers : HIFI (instrument hétérodyne pour l'observation dans l'infrarouge lointain, SPIRE (récepteur d'imagerie spectrale et photométrique et PACS (photomètre et spectromètre à grand champ). L'ASC a contribué à deux instruments pour cette mission, HIFI et SPIRE. Le HIFI a permis de mieux comprendre la chimie interstellaire et de détecter et d'analyser les émissions de différentes molécules, tandis que le SPIRE a exploré la formation de la structure des galaxies et étudié les tout premiers stades de formation des étoiles.

UVIT sur ASTROSAT

L'entente entre l'ASC et l'Organisation indienne de recherche spatiale sur la mission ASTROSAT a été signée en 2004. La mission de ce satellite lancé en 2015 se poursuit et il continue de transmettre des données. On prévoit qu'ASTROSAT fonctionnera jusqu'en 2020. L'objectif de la mission est l'observation des corps célestes dans l'ultraviolet et les rayons X. En contrepartie de la participation du Canada à cette mission, du temps d'observation avec le satellite est attribué aux scientifiques canadiens qui peuvent mener des recherches astronomiques uniques. La participation du Canada à ASTROSAT a été financée par l'ASC et le Conseil national de recherches du Canada (CNRC). ASTROSAT comporte cinq instruments : UVIT (télescopes imageurs dans l'ultraviolet), LAXPC (grands compteurs proportionnels de rayons X), SXT (télescope pour les rayons X mous), CZTI (imageur au tellurure de cadmium et de zinc) et le SSM (scanneur de surveillance du ciel). L'ASC a fourni les composants électroniques des détecteurs de l'UVIT et en a fait l'étalonnage. Les détecteurs captent chaque photon et enregistrent son emplacement et le temps d'arrivée.

MSL — APXS

La mission Mars Science Lab (MSL) a été lancée en 2011, elle a atterri sur Mars en 2012 et est toujours opérationnel. La mission MSL est dirigée par la NASA et elle a pour but l'exploration de la surface de Mars

par l'éclaireur Curiosity. La mission s'intéresse à la géologie et au climat martiens. MSL avait à son bord 13 instruments, dont :

- trois caméras : MastCAM (caméra montée sur mât), MAHLI (caméra microscope) et MARDI (caméra d'atterrissage)
- quatre spectromètres : APXS (spectromètre à particules alpha et à rayons X), ChemCam (spectromètre et camera pour la chimie), CheMin (instrument d'analyse chimique et minéralogique) et la série d'instruments d'analyse (SAM) des échantillons martiens
- deux détecteurs du rayonnement : RAD (détecteur d'évaluation du rayonnement) et DAN (détecteur de neutrons).

Les deux instruments restants sont la station météorologique REMS et le système de contrôle d'entrée dans l'atmosphère, de descente et d'atterrissage (MEDLI). L'ASC a contribué à la mission MSL en fournissant l'instrument APXS qui analyse les échantillons pour déterminer leur composition chimique et en soutenant les activités de recherche de trois scientifiques participant à cette mission.

OLA d'OSIRIS-REx

Dirigée par la NASA, la mission OSIRIS-REx, a été lancée en 2016. La sonde se dirige actuellement vers sa destination, l'astéroïde Bennu. OSIRIS-REx atteindra Bennu en 2018 et passera environ deux ans à le cartographier afin de trouver un site d'échantillonnage approprié. En 2023, l'échantillon prélevé sera rapporté sur Terre où il sera étudié. OSIRIS-REx emporte cinq instruments, soit OCAMS (l'ensemble de caméras d'OSIRIS-REx), OLA (l'altimètre laser OSIRIS-REx), OTES (le spectromètre d'émission thermique d'OSIRIS-REx), OSIRIS (le spectromètre dans le spectre visible et l'infrarouge OSIRIS-REx) et REXIS (le système d'imagerie à rayons X du régolite). Le Canada a participé à la mission en fournissant OLA et en soutenant le travail de recherche de quatre scientifiques additionnels. L'OLA scrutera toute la surface de Bennu pour générer un modèle 3D de la topographie de l'astéroïde pour en déterminer le contexte géologique et faciliter le choix d'un site sûr pour le prélèvement d'échantillons.

JWST — NIRISS

La mission du télescope spatial James-Webb est en cours de réalisation et le lancement est prévu en 2018-2019. On s'attend à ce que le JWST soit l'observatoire spatial le plus puissant pendant une décennie ou plus après son lancement. La mission a pour objectif de découvrir et de cartographier la formation et l'évolution des premières étoiles et des galaxies les plus anciennes et de tenter de déterminer si la vie est possible ailleurs dans l'Univers. Ce télescope sera doté de quatre instruments scientifiques : NIRCam (caméra pour l'infrarouge proche, NIRSpec (spectrographe dans l'infrarouge proche), NIRI (instrument pour l'infrarouge moyen) et NIRISS (imageur et spectrographe sans fente dans l'infrarouge proche). L'ASC a contribué à la création du NIRISS conçu pour la détection de la première lumière, la détection d'exoplanètes et la spectroscopie avec masque des exoplanètes.

Engins spatiaux et sous-systèmes canadiens

JWST — FGS

En plus de l'instrument scientifique NIRISS, l'ASC a fourni un sous-système essentiel à la mission du JWST : le FGS (le système de guidage fin) qui est une caméra réglable servant à pointer très précisément le télescope sur son objectif. On considère qu'il s'agit du système de guidage le plus précis jamais construit pour un télescope spatial et qu'il permettra au JWST de capter des images de grande qualité.

MOST

Le satellite MOST de l'ASC a constitué la première mission d'astronomie canadienne dirigée par le Canada, ainsi que le premier télescope spatial d'astronomie au monde à bord d'un microsatellite. L'instrument servait à déterminer l'âge et la composition des étoiles en mesurant précisément leurs variations d'intensité. On l'a également utilisé pour observer le transit des exoplanètes. MOST a été lancée en 2003, et son financement a été assuré par l'ASC jusqu'en 2014, après quoi l'engin a été vendu à une entreprise privée qui en a poursuivi l'exploitation et qui loue les services de MOST à des clients du domaine des sciences. Il s'agit du premier cas de privatisation d'une mission scientifique spatiale canadienne.

NEOSSat

Approuvée en 2005, la mission du microsatellite NEOSSat a été dirigée par l'ASC et par Recherche et développement pour la défense Canada. La phase de conception de la mission a commencé en 2007 et le satellite a été lancé en 2013. Une fois entré en service, le satellite a connu de nombreux problèmes. Il est maintenant fonctionnel, mais ne satisfait pas aux exigences initiales de la mission en matière d'astronomie spatiale. Le but de la mission est d'obtenir des mesures utiles sur les astéroïdes proches de la Terre, et d'évaluer les astéroïdes et les comètes pouvant présenter un danger. La contribution de NEOSSat pour le Canada et le monde est l'obtention d'informations ciblées sur la population des objets potentiellement dangereux proches de la Terre.

ASTRO-H – CAMS

Le projet de mission a commencé en 2008, sa phase de conception s'est déroulée de 2011 à 2014 et ASTRO-H a été lancé en février 2016. Toutefois, la base de commande au sol au Japon a perdu tout contact avec le satellite deux mois plus tard. Le Canada a contribué à la mission ASTRO-H en participant à la conception du télescope à rayons X durs. En 2009, la JAXA, l'agence spatiale du Japon, avait demandé à l'ASC de fournir un système de mesure optique pour le télescope à rayons X durs. L'ASC a construit CAMS, le Système canadien de métrologie spatiale destiné au satellite ASTRO-H, et l'a livré à JAXA en 2015. Le CAMS a été conçu pour permettre aux opérateurs de la mission d'étalonner les données du télescope à rayons X durs et ainsi améliorer la qualité des images. La mission ASTRO-H a été financée par le gouvernement du Canada afin que les astronomes canadiens puissent continuer à jouer un rôle important sur la scène internationale de l'astronomie. Les objectifs de la mission étaient d'étudier la structure des trous noirs, des galaxies actives et d'autres phénomènes cosmiques existant dans des conditions extrêmes.

4.2.2 Objectifs immédiats

Question n° 8 de l'évaluation (efficacité) : A-t-on un accès continu à des données scientifiques ?

Constatation n° 8 : Au fil des ans, les instruments canadiens d'astronomie spatiale et de missions planétaires ont transmis un flux continu de données d'observation et d'images de qualité et de types divers. En principe, les données étalonnées doivent être accessibles dans les six mois dans des archives publiques afin que tous les chercheurs puissent les utiliser. La participation des chercheurs principaux et des équipes scientifiques à la conception des instruments ou aux phases suivant la fin de l'exploitation des instruments, ou les deux, n'a pas toujours été soutenue financièrement à cause d'un manque de subventions, ce qui a une incidence négative sur la qualité, le traitement et l'analyse des données, et limite la contribution des équipes scientifiques aux objectifs en matière de connaissances.

Dans le Rapport ministériel sur le rendement des sous-programmes et des sous-sous-programmes en 2015–2016, on affirmait que cinq missions planétaires et missions d'astronomie spatiale avaient permis de fournir des données à la communauté scientifique canadienne, dépassant ainsi l'objectif de quatre missions. Selon la revue de d'autres documents internes résumée par la figure 1 et les descriptions connexes des missions, les missions d'astronomie spatiale et les instruments scientifiques suivants étaient fonctionnels et ont transmis des données pendant la période évaluée : Herschel (HIFI, SPIRE), Planck (HFI, LFI), MOST et NEOSSat. Du côté des missions planétaires, l'instrument APXS — la contribution canadienne à l'éclaireur Curiosity de la mission MSL — est le fournisseur de données scientifiques le plus constant et productif. Ces missions et leurs instruments scientifiques ont produit un éventail de types de données, incluant notamment sur les rayons infrarouges, optiques et rayons-X, à des fins de recherche uniques. La qualité des données fournies par NEOSSat depuis son lancement est problématique, et des essais se poursuivent pour déterminer comment le satellite pourrait produire des données scientifiques utiles[41].

Le mouvement pour des *données ouvertes* s'est accéléré pour les sciences spatiales. Par exemple, la NASA exige des chercheurs principaux qu'ils s'assurent que toutes les données transmises sont étalonnées et archivées dans les six mois suivants la date de leur téléchargement. En principe, on élargi l'accès public aux données scientifiques et on accorde à des scientifiques n'ayant aucun lien avec les missions, mais disposant des plateformes logicielles et des outils nécessaires, l'occasion de mener leur propre recherche.

Bien que la fin d'une mission implique la fin de la période de collecte des données, le soutien offert avant et après la période opérationnelle pour définir les exigences en matière de données, l'instrumentation, le traitement des données et l'analyse est aussi important. Le programme de la NASA prévoit le financement du début à la fin des travaux scientifiques portant sur la conception des instruments, la production de logiciel, le traitement des données et l'analyse des échantillons rapportés. Les données d'entrevues nous informent que les critères des appels d'offres compétitifs de la NASA exigent que les propositions de contribution à une mission incluent le financement de ces activités scientifiques. Au cours de la présente évaluation, nous avons pris note que les missions Herschel et Planck se sont terminées en 2013, qu'il y a eu prolongation jusqu'en mars 2016 du soutien de l'ASC pour le traitement des données et l'analyse après la phase opérationnelle et que l'ASC a subventionné la production du logiciel d'analyse des données

obtenues avec les instruments HFI et LFI de la mission Planck. Cependant, selon les données d'entrevue, on applique de manière inégale le principe du financement du début à la fin de la participation des équipes scientifiques aux MAS et aux MP.

Les deux études de cas de l'évaluation documentent le rôle important qu'ont joué les chercheurs principaux dans la construction d'instruments scientifiques qui ont contribué ou contribueront au succès des missions MSL et JWST. Une collaboration étroite entre les partenaires de l'industrie spatiale et le personnel de l'ASC était cruciale pour s'assurer que la conception instrumentale satisfaisait aux spécifications des données définies par l'équipe scientifique. Les données des entrevues ont montré que la participation précoce de l'équipe scientifique à la définition des besoins scientifiques de la mission a été un facteur clé pour le succès, tout comme était l'engagement précoce à financer l'analyse des données par l'équipe du chercheur principal ou l'équipe scientifique. Les données d'entrevues indiquent qu'une des barrières à la participation de l'équipe scientifique de la façon suivante :

- le poste budgétaire « soutien de l'équipe scientifique » du contrat des partenaires de l'industrie spatiale laisse beaucoup de place à l'interprétation de son intention. Souvent, il n'est pas clair qui est le destinataire des fonds : est-ce le partenaire de l'industrie qui nécessite un soutien, ou l'équipe scientifique qui doit être soutenue dans l'exécution de ses responsabilités ?

Il a été considéré que la disponibilité de financement pour soutenir l'équipe du chercheur principal ou l'équipe scientifique pendant les phases des opérations avant et après la mission était préférable et leur permettrait de mieux guider la conception des instruments, de produire les logiciels et les outils d'analyse de données et de soutenir la recherche scientifique après la mission. À l'heure actuelle, on considère que ces équipes sont désavantagées par rapport à leurs collègues chercheurs qui ne sont pas chargés des responsabilités de l'exploitation de l'instrument scientifique et de respecter les exigences d'accès ouvert aux données, ce qui ne leur laisse que peu de temps pour contribuer à l'avancement des connaissances.

Question n° 9 de l'évaluation (efficacité) : Le nombre de personnes hautement qualifiées (PHQ) a-t-il augmenté ?

Constatation n° 9 : Le nombre de professeurs et d'étudiants qui ont reçu un financement ou ont été employés dans le cadre de contrats liés à une mission a fluctué pendant le temps de l'évaluation étant donné le rythme irrégulier des recherches et missions scientifiques. La cible de 40 professeurs et de 30 étudiants pour les missions d'astronomie spatiale a été dépassée alors que la cible de 60 professeurs et 50 étudiants pour les missions planétaires n'a pas été atteinte.

Le Sondage annuel de l'ASC du secteur spatial canadien a recensé les personnes hautement qualifiées (PHQ) par région du Canada par rapport à la main d'œuvre nationale depuis 1996. « La mesure des PHQ consiste en un repérage du nombre d'ingénieurs, de scientifiques et de techniciens employés dans le secteur spatial canadien[42]. » Dans la documentation interne disponible, nous n'avons pas trouvé de données ventilées au niveau des sous-sous-programmes. Des problèmes de fiabilité des données de

mesures de rendement présentées pour l'exercice 2015-2016 affectent aussi la fiabilité de l'ensemble des données sur les PHQ, étant donné les fluctuations d'une année à l'autre du nombre de professeurs qui ont reçu un financement pour les missions d'astronomie spatiale ou des missions planétaires et le nombre d'étudiants et stagiaires postdoctoraux ayant travaillé à des projets financés par des missions d'astronomie spatiale ou des missions planétaires. Toutefois, en moyenne, la cible de rendement du programme d'astronomie spatiale de 40 professeurs et 30 étudiants a été dépassée avec 55 professeurs et 46 étudiants. Dans le cas du programme de missions spatiales, la cible de 60 professeurs et 50 étudiants n'a pas été atteinte, car seulement 14 professeurs et 29 étudiants en ont profité[43].

Les deux études de cas de l'étude donnent un certain éclairage sur les fluctuations du nombre de PHQ recevant un financement de l'ASC ou participant à des projets financés. Pour la mission du télescope spatial James Webb, COM DEV a employé au moins une douzaine de PHQ, alors que dans les universités ce projet n'a impliqué qu'environ une douzaine de professeurs. Pendant les périodes de pointe de conception, de construction et d'essais des instruments embarqués NIRISS et FGS, avant leur livraison à la NASA, COM DEV estime que son effectif de PHQ a culminé à 50 personnes, dont la majorité n'aurait pas autrement été employée par l'entreprise. L'Université de Montréal emploiera aussi d'autres stagiaires postdoctoraux en automne 2017 pour analyser les données du spectroscope-imageur NIRISS afin de créer une expertise qui autrement ne se serait pas développée.

L'étude de cas de l'APXS du Mars Science Laboratory suit un schéma similaire : un petit groupe central de PHQ travaille chez MDA pendant la durée du projet, et 10 à 15 professeurs et étudiants universitaires collaborent avec le chercheur principal. Le nombre de PHQ employé par MDA n'a pas culminé au même point que chez COM DEV étant donné la maturité de la technologie de ce spectromètre. Toutefois, l'Université de Guelph emploiera davantage de professeurs et d'étudiants pour continuer à analyser la richesse des données que l'instrument aura collectées.

Les fluctuations très importantes de l'emploi de PHQ, au niveau des sous-sous-programmes pourraient mieux se comprendre si l'on tenait compte des fluctuations des effectifs de PHQ employées par l'industrie spatiale et les universités partenaires pendant le cycle de vie du projet.

Question n° 10 de l'évaluation (efficacité) : Les missions spatiales ont-elles accentué la présence canadienne dans l'espace ?

Constatation n° 10 : Pendant chaque année de la période considérée par l'évaluation, au moins deux missions d'astronomie spatiale et une mission d'astronomie planétaire ont été opérées. L'importance des missions MSL et JWST et le rôle important qu'y jouent les instruments scientifiques et les sous-systèmes APXS et NIRISS-FGS ont, sinon rehaussé la réputation du Canada, accru sa présence dans l'exploration spatiale.

Comme le montre la figure 1 plus haut, au début de la période d'évaluation, le Canada réalisait trois missions d'astronomie spatiale (Herschel, Planck, MOST) et une mission planétaire (MSL). Les trois missions d'astronomie spatiale se sont conclues en 2013. Les missions d'astronomie spatiale ont subi

quelques revers, notamment les problèmes de qualité des données de NEOSSat depuis son lancement en 2013 et la perte regrettable de la mission ASTRO-H de JAXA en 2016. Le satellite indien ASTROSAT qui contient l'instrument scientifique canadien UVIT est opérationnel et transmet des données depuis la réussite de sa mise en orbite en 2015. Il s'agit de la seule mission d'astronomie spatiale en cours qui assure une présence du Canada dans l'espace.

La mission MSL de la NASA qui emporte le spectroscope APXS du Canada est opérationnelle depuis 2012. Il s'agit de la seule mission planétaire en cours qui assure une présence du Canada dans l'espace. Cette mission est très médiatisée, de toute évidence fructueuse, et le Canada y a fait une contribution importante tel que détaillée dans l'étude de cas. Il est à noter que la sonde OSIRIS-Rex de la NASA emportant l'instrument scientifique canadien OLA, lancée en 2016, atteindra l'astéroïde Bennu en 2018, et la mission très médiatisée JWST, comportant une contribution canadienne (NIRIS-FGS), devrait être lancée en 2018-2019 et sera opérationnelle un an plus tard. L'évaluation a constaté que l'importante contribution faite à cette entreprise scientifique prestigieuse a rehaussé la réputation du Canada. Pour résumer, le rôle et les contributions du Canada ont rehaussé sa présence dans l'espace.

Question n° 11 de l'évaluation (efficacité) : La compétence du secteur spatial dans le domaine de l'exploration spatiale s'est-elle enrichie ?

Constatation n° 11 : La compétence des chercheurs et étudiants participant à des recherches scientifiques connexes aux missions d'astronomie spatiale et de missions planétaires s'est accrue et s'est même mérité un soutien pour la création d'instituts de recherches spécialisés. Le rythme irrégulier de ces programmes n'a toutefois pas avantagé les partenaires de l'industrie spatiale qui doivent maintenir leurs flux de revenus et, entre les contrats, doivent remercier leur précieux personnel hautement qualifié.

Les données d'entrevues et de l'enquête en ligne indiquent que les programmes de missions d'astronomie spatiale et des missions planétaires ont eu un effet positif sur les compétences des partenaires universitaires et de l'industrie spatiale actifs dans le secteur de l'exploration spatiale. Selon leurs expériences personnelles en tant que membres d'une équipe de mission scientifique, ils détiennent des compétences nouvelles et élargies, notamment dans la production de logiciel, l'instrumentation, l'acquisition d'images et la gestion de la modulation et des données. D'un point de vue institutionnel, la participation à des missions spatiales a facilité le recrutement de stagiaires postdoctoraux et d'étudiants très performants à des programmes scientifiques, et leur apprentissage s'est accéléré en conséquence de leur travail sur des projets liés à des missions. De plus, la possibilité de participer à des missions ou des recherches spatiales très médiatisées a suscité à la fois l'intérêt de jeunes scientifiques pour l'exploration spatiale et le développement d'institutions comme le prouvent la constitution d'équipes de chercheurs à l'Université de Guelph et la création de l'*Institut de recherche sur les Exoplanètes* de l'Université de Montréal.

Les partenaires de l'industrie spatiale ont aussi reconnu que leur participation à des missions d'astronomie spatiale ou des missions planétaires avaient élargi leurs compétences en gestion de grands projets, en innovations technologiques, en collaboration avec le milieu académique, et en expérience de relations

avec le secteur spatial au palier international. Ces compétences pourront être réinvesties dans de futures missions spatiales et applications commerciales. Parmi les répondants à l'enquête en ligne, 48 % ont évalué que l'enrichissement de leurs compétences était égal ou supérieur à leurs attentes, 38 % qu'ils avaient enrichi leurs compétences, et 11 % qu'il l'avait fait dans une certaine mesure. Les compétences clés mentionnées par les deux groupes d'intervenants incluaient la mise au point d'instruments scientifiques, la production de logiciels et de techniques de traitement de données, le développement commercial et la production de propositions.

On notera que bien que les partenaires de l'industrie spatiale eussent signalé un enrichissement de leurs compétences, ils ont éprouvé de la difficulté à maintenir leur flux de revenu et à conserver leur personnel hautement qualifié entre les contrats de mission. Le rythme sporadique et irrégulier des missions d'astronomie spatiale et des missions planétaires — or, aucune n'a été annoncée depuis les cinq dernières années — est une source d'inquiétude, car leurs capacités et compétences se tarissent pendant l'absence de nouvelles occasions de contrat. De plus, puisque les règles d'approvisionnement et les pratiques des agences spatiales d'autres pays favorisent leur industrie spatiale et leurs scientifiques lors de l'attribution de contrats, il est difficile de développer avec succès les marchés spatiaux d'autres pays.

4.2.3 Objectifs intermédiaires

Question n° 12 de l'évaluation (efficacité) : Le secteur canadien de l'exploration spatiale est-il mieux placé pour saisir des occasions dans le domaine spatial ?

Constatation no 12 : Les agences spatiales d'autres pays et d'autres partenaires internationaux sollicitent fréquemment l'expertise, la technologie et l'attitude positive des chercheurs des universités et des entreprises de l'industrie spatiale du Canada. Leur capacité démontrée de livraison de composants cruciaux pour les missions et d'instruments scientifiques les positionne pour les missions de suivi, bien que certaines, comme Mars 2020 et New Frontiers-4, n'ont pas reçu du soutien.

La participation du secteur canadien de l'exploration spatiale aux missions d'astronomie spatiale ou aux missions planétaires a été plutôt modeste étant donné le nombre total d'universités canadiennes et d'entreprises du secteur spatial qui pourraient potentiellement y contribuer. L'examen de la documentation interne a révélé qu'en 2011, quatorze universités canadiennes participaient à des missions d'astronomie spatiale nationales et internationales et, qu'en 2016, à la fin de la période d'évaluation, le nombre d'universités participantes était le même. Pendant la même période, le nombre d'universités canadiennes participant à des missions planétaires est passé de neuf à douze. Pendant cette période, quatre entreprises canadiennes du secteur spatial ont participé à des missions d'astronomie spatiale et deux à des missions planétaires.

En dépit de sa taille modeste, ce segment actif du secteur de l'exploration spatiale a été sollicité ou cours des années pour son expertise en technologie et ses connaissances scientifiques en astronomie et en sciences planétaires, notamment la conception de systèmes optiques cryogéniques, les expertises ans les algorithmes de suivi et les algorithmes scientifiques, la gestion et le traitement de données et la robotique.

Une compilation des invitations à participer aux missions internationales de la NASA, de l'ASE, de JAXA et des agences spatiales russes et indiennes atteste de la grande réputation dont jouissent les universités et les partenaires industriels du Canada auprès de la communauté internationale. Les données d'entrevues colligées pour les études de cas sur les missions JWST et MSL confirment que la grande visibilité de ces deux missions de la NASA et la démonstration et l'application des savoir-faire technologiques, techniques et scientifiques innovants ont considérablement contribué à la compétitivité internationale du Canada. Le succès de la collaboration entre les universités, l'industrie et le gouvernement dans ces ceux missions a été qualifié d'exceptionnel et de rare par d'autres administrations gouvernementales.

L'expérience passée a démontré que l'expertise et un dossier de réalisations fructueuses ont suscité un nombre croissant d'opportunités de participation à l'exploration spatiale. Par exemple, selon les données d'entrevues, la participation des scientifiques canadiens à la mission Planck de l'ASE a été cruciale pour leur collaboration à la mission Euclid, aussi de l'ASE, la contribution des capteurs fins d'erreurs utilisés pour stabiliser et pointer le télescope de la mission FUSE (Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer) de la NASA s'est traduite par l'invitation de celle-ci à contribuer au capteur de guidage fin du JWST, la construction de l'atterrisseur martien Phoenix par MDA a permis le succès de sa proposition d'un contrat pour l'éclaireur ExoMars et, plus récemment, la contribution du Canada aux missions de l'atterrisseur Phoenix de la NASA et à l'éclaireur Curiosity du Mars Science Laboratory a servi à produire une proposition concurrentielle et fructueuse de participation à la mission OSIRIS-REx.

Les résultats de l'enquête en ligne confirment ces constatations. En effet, les attentes de réaliser des travaux subséquents en exploration spatiale ont été satisfaites ou dépassées pour 42 % des répondants, alors que les attentes de 37 % des répondants ont été satisfaites à un certain point. Plusieurs exemples d'attribution directe ont été cités : la participation de scientifiques canadiens à la mission Herschel de l'ASE a conduit à une invitation à participer à la mission SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics) de la JAXA dont le lancement est prévu pour 2027-2028 ; de manière analogue, la mise au point du CAMS (Canadian ASTRO-H Metrology System) pour la mission ASTRO-H de la JAXA aurait mené au succès d'une proposition de contrat pour la fourniture par une entreprise de la même technologie de métrologie laser pour la mission des deux satellites PROBA -3 de l'ASE.

Toutefois, le secteur canadien de l'exploration spatiale n'a pas saisi certaines opportunités, bien que le Canada fût bien positionné pour le faire, notamment les missions Mars 2020 et New Frontiers -4, et ce, à cause de circonstances exposées en détail dans les études de cas de l'évaluation. D'autres opportunités n'ont pas non plus été poursuivies, comme le démontre la liste des invitations à des missions d'astronomie spatiale ou des missions planétaires reçues par l'ASC pendant la période évaluée.

Question n° 13 de l'évaluation (efficacité) : Le transfert du savoir-faire et de technologies à d'autres applications a-t-il augmenté ?

Constatation n° 13 : Les compétences acquises comme chercheur principal, membre d'une équipe scientifique ou ingénieur d'une mission a facilité la mobilité de PHQ dans le secteur spatial dans les milieux universitaires, industriel ou gouvernemental. Le transfert de technologies spatiales à un contexte

terrestre a été réalisé dans certains cas pour l'optique, la robotique, les piles à combustible et les lasers, alors que la réutilisation potentielle de technologie spatiale pour d'autres missions spatiales est clairement un avantage concurrentiel s'est produit plus souvent.

Le présent rapport a déjà évalué dans quelle mesure la participation à des missions d'astronomie spatiales et des missions planétaires avait élargi les compétences des partenaires industriels et universitaires. Les connaissances, l'expertise et la confiance acquises au cours des missions récentes, ainsi que les technologies innovatrices mises au point auraient pu être transférées à d'autres contextes spatiaux ou terrestres. L'ampleur de ces transferts n'a pas étudié, documenté ou rapporté rigoureusement.. Une exception notable est le *Rapport ministériel sur le rendement 2013-2014*[44] qui cite sept exemples de réutilisation de connaissances ou de technologies issues de l'exploration spatiale : Opal-360, LiDAR, caméras Nuvu, Sitelle, technologies Xiphos, NORCAT et des éléments clés de l'éclaireur martien.

Le flux de grands et petits projets de mission d'astronomie spatiale ou de missions planétaires auxquels l'industrie ou les universités canadiennes ont participé pendant la dernière décennie a créé un secteur unique de l'exploration spatiale qui exige un fort degré de mobilité des PHQ. Comme nous le mentionnions précédemment, l'attraction et la rétention de ces personnes par les entreprises d'exploration spatiale ont été difficiles et, selon les données des entrevues, les compétences acquises sont souvent transférées à d'autres contextes dans les universités, les laboratoires de recherches gouvernementaux ou d'autres nouvelles entreprises fructueuses de l'industrie spatiale. Les compétences acquises ne sont jamais perdues dans la mesure où les PHQ tendent à demeurer dans le secteur spatial canadien, ce qui n'a pas toujours été le cas étant donné le manque d'opportunités mentionné plus haut.

Les données de l'enquête en ligne indiquent qu'à cet égard, 31 % des répondants ont déclaré que leurs attentes relatives au transfert de compétences et de technologie à d'autres applications de l'exploration spatiale avaient été satisfaites ou dépassées, mais que les transferts à des applications terrestres n'avaient dépassé ou satisfait les attentes que pour 10 % des répondants. La nécessité continue d'un programme robuste d'exploration spatiale était un facteur critique pour la mesure dans laquelle les compétences sont transférées.

Les technologies mises au point pour l'espace et décrites dans les études de cas du JWST et du MSL ont été conçues pour un environnement cryogénique ou autrement extrême et sans équivalent ou très rarement sur Terre. Ces technologies très innovatrices et soumises des normes strictes de performance pourraient devoir attendre longtemps avant de trouver une application terrestre, puisque le processus de l'innovation n'est ni prévisible, ni linéaire, ni rapide. Les données d'entrevues ont soulevé des exemples de retombées ou d'extension d'une technologie, comme la technologie de détection et mesure des distances par la lumière (LiDAR) de MDA. À tout le moins, ces entreprises peuvent se vanter d'avoir un avantage pour l'innovation technologique, car elles ont prouvé leur performance dans les conditions les plus rigoureuses.

Quelques technologies mises au point pour l'espace qui ont eu des retombées pour des applications terrestres ont aussi été mentionnées lors des entrevues ou dans l'enquête en ligne, notamment le

microscope dans les térahertz pour le diagnostic du cancer du sein, un spectromètre pour le diagnostic de fusion nucléaire, des caméras numériques miniatures pour une utilisation biomédicale, l'utilisation de la plateforme de l'éclaireur martien dans des véhicules lourds, des instruments de télédétection dans des environnements extrêmes et les technologies d'observation aérienne. Certains de ces exemples chevauchent ceux cités antérieurement dans le *Rapport ministériel sur le rendement 2013-2014* et semblent être des points communs de référence pour démontrer des avantages économiques potentiels. Toutefois, ce qui est plus évident à partir de la constatation ci-dessus et de son texte de justification, est le potentiel élevé de réutilisation des compétences et de technologies innovatrices dans les futures missions spatiales.

Question n° 14 de l'évaluation (efficacité) : A-t-on accru nos connaissances de l'Univers, du Système solaire et de la capacité humaine à vivre dans l'espace ?

Constatation n° 14 : Fort d'une longue histoire d'accès aux données d'observatoires terrestres et, plus récemment, spatiaux, les astronomes canadiens sont reconnus comme étant des chefs de file pour la qualité et l'impact de leurs recherches. La multiplication par presque deux de la production scientifique des chercheurs financés par les missions d'astronomie spatiale semble le prouver, mais ceux financés par les missions planétaires n'ont pas eu autant de succès.

L'étude du cas du JWST relate brièvement l'histoire de l'astronomie au Canada, de l'expansion de la communauté astronomique canadienne, de la fondation d'observatoires et de la croissance de l'association professionnelle, la Société canadienne d'astronomie qui joue un rôle important pour déterminer les priorités scientifiques pour la communauté. Bien qu'elle soit d'une vaste portée et qu'elle remonte à 2010, une étude bibliométrique du rendement et de l'impact de la recherche canadienne en astronomie ou astrophysique a tiré la conclusion suivante fondée sur les indicateurs habituels du milieu que sont la moyenne des citations relatives (MCR) et la moyenne des facteurs d'impact relatifs (MRIF) :

> Le Canada se démarque parmi les chefs de file mondiaux de ce domaine, en particulier pour l'incidence de ses recherches pour la communauté scientifique (deuxième score pour le MRC) et la qualité de ses recherches (première place pour le MRIF)[45].

Des données bibliométriques plus récentes colligées par la bibliothèque de l'ASC indiquent une croissance continue de la production scientifique des chercheurs financés par les missions d'astronomie spatiale et les missions planétaires, mesurée par le nombre de publications scientifiques soumises au jugement des pairs. Pendant la période de l'évaluation, le nombre de publications a presque doublé dans le cas de l'astronomie spatiale, passant de 82 à 149, alors qu'il est passé de 15 à 20 dans le cas de la planétologie[46]. Les données d'entrevues confirment également la production scientifique des chercheurs en astronomie spatiale participant à la mission Planck de l'ASE.

> En contrepartie du soutien du Canada, les chercheurs canadiens ont pu avoir accès aux données collectées par la mission sur le rayonnement de fond cosmique. Une première diffusion de données a eu lieu en 2011, suivi d'une diffusion publique en 2013 et d'une

publication plus complète en 2015. En octobre 2015, la revue *Astrononomy & Astrophysics* publiait 28 articles scientifiques fondés sur les données de 2015.

En parallèle, les données d'entrevues relatives à la mission Herschel de l'ASE indiquent que l'instrument HIFI a généré une forte production scientifique portant sur la détection d'eau dans l'espace, soit la publication de 33 articles, dont 25 découlaient directement de temps d'observation garanti au Canada. Du côté des missions planétaires, l'équipe scientifique a largement exploité les données du spectroscope APXS. Les deux tiers des membres ont utilisé les données pour produire 60 publications revues par les pairs. Bien que pendant la période d'évaluation, l'instrument scientifique NIRISS construit au Canada pour le JWST n'aura pas encore été utilisé, il existe un fort potentiel pour des découvertes au cours des 420 heures garanties de temps d'observation.

4.2.4 Objectifs ultimes

Question n° 15 de l'évaluation (efficacité) : Pouvons-nous attribuer une croissance économique soutenue aux programmes ?

Constatation n° 15: L'évaluation a trouvé peu de preuves permettant d'attribuer une croissance économique soutenue aux programmes de MAS et MP, bien que l'on ait trouvé une poignée de cas pour lesquels des retombées et des extensions de technologies spatiales semblaient avoir un certain potentiel commercial et économique. Également, le fait que deux partenaires majeures de l'industrie (MDA, COM DEV) ont fusionné ou vendu des actifs cruciaux à une firme états-unienne en 2016 n'est pas un indicateur favorable de croissance économique future.

La croissance économique soutenue est généralement comprise comme étant la hausse ininterrompue de la valeur de biens et services produits par une économie pendant un temps très long. Selon les états financiers fournis par la direction des finances de l'ASC, le 31 mars 2017, et présentés plus haut dans le présent rapport (tableau 1), les programmes de missions d'astronomie spatiale et de missions planétaires ont déboursé 111 millions de dollars pendant la période d'évaluation de cinq ans. Les fonds transférés par le secteur de l'exploration spatiale — calculés à partir de la ventilation des catégories des dépenses en subventions et contributions, dépenses d'immobilisations et contrats — se sont élevés à 83,5 % du total, soit 92,7 millions de dollars. En comparaison, le secteur spatial canadien a généré des revenus totaux de 3,4 milliards de dollars en 2011[47] et de 5,3 milliards en 2015[48].

Une analyse plus approfondie des revenus du secteur spatial par sous-secteur d'activité nous permet de faire une évaluation générale de l'apport des programmes de MAS et MP à la croissance économique. Les revenus du secteur de l'exploration ont été estimés à 114 millions de dollars en 2009, ils ont décru à 86 millions en 2013[49] avant de rebondir à 112 millions en 2015[50]. Entre 2011 et 2015, les revenus de l'exploration spatiale ont décru par rapport à ceux du secteur spatial, passant de 3,35 % à 2,11 % des revenus totaux. Avec des dépenses réelles totales de 92,7, ou 18,54 millions de dollars par année, aux intervenants, les programmes de missions d'astronomie spatiale et de missions planétaires constituent environ 16,5 % des revenus du sous-secteur de l'exploration spatiale et moins de la moitié d'un point de

pourcentage des revenus totaux du secteur spatial canadien dans son ensemble. Bien que la stimulation économique directe puisse ne pas être significative, il pourrait être utile d'examiner les avantages économiques de ces programmes.

L'évaluation a examiné dans quelle mesure les projets de missions d'astronomie spatiale et de missions planétaires avaient entraîné un financement subséquent par d'autres organisations ou des contrats avec d'autres agences spatiales. Les données de l'enquête en ligne ont indiqué qu'il n'existait que peu d'autres alternatives pour les projets de recherche en exploration spatiale. Parmi tous les répondants à l'enquête, 63 % ont indiqué que ces programmes étaient l'unique source de financement, alors que 37 % ont mentionné d'autres sources, notamment les conseils subventionnaires de recherche (par ex., le CRSNG) et les organisations où travaillent les chercheurs. Nous estimons que la contribution des programmes de missions d'astronomie spatiale et missions planétaires constituait plus de 70 % des coûts totaux du projet de 80 % des répondants. Une exception unique et importante a été mentionnée dans l'étude de cas du JWST, soit un don de deux millions de dollars à l'Université de Montréal de la part de la fondation de la famille Trottier pour créer le nouvel *Institut de recherche sur les exoplanètes*. Ce don financera des étudiants et des stagiaires postdoctoraux qui analyseront les données collectées par l'instrument scientifique NIRISS du JWST et publieront les résultats de leurs recherches.

Les contrats subséquents avec d'autres agences spatiales sont rares pour les scientifiques individuellement et les intervenants de l'industrie spatiale, bien que le présent rapport mentionne certains cas. Les données d'entrevues mentionnent que les tentatives de l'industrie spatiale canadienne d'exporter des biens et services liés à l'espace font face aux difficultés suivantes : les politiques d'approvisionnement et pratiques favorisant le recours aux scientifiques et entreprises nationales, les lois et règlements sur le contrôle des exportations (tels que l'*International Traffic in Arms Regulations* des États-Unis), ainsi que la forte concurrence internationale. Une des forces perçues de l'industrie spatiale canadienne est de tirer parti de la participation aux missions spatiales pour créer des leaderships de niche en optique, robotique, piles à combustible et technologie laser. Les données d'entrevues et la documentation parallèle trouvée via Internet citent souvent la technologie canadienne de détection et de télémétrie par ondes lumineuses (LiDAR) comme un exemple de retombées technologiques et d'utilisation spatiale. Le Lidar utilise la lumière pulsée du laser pour mesurer des distances variables et au Canada et a été largement employée pour des utilisations terrestres, notamment la télédétection. Elle a été développée davantage pour une utilisation spatiale par des entreprises comme Optech à Toronto et MacDonald, Dettwiler et associés (MDA) qui ont construit le système de détection météo, la contribution canadienne à l'atterrisseur martien Phoenix. MDA a ensuite utilisé son expertise et sa technologie sur l'instrument scientifique du Canada de la mission OSIRIS-Rex de la NASA, lancée en 2016. OLA (OSIRIS-REx Laser Altimeter) contribue à la navigation de la sonde vers l'astéroïde Bennu. L'instrument balaiera l'astéroïde , créera une carte numérique tridimensionnelle de sa surface et aidera la sonde à y atterrir. Le groupe de conception d'Ottawa Neptec a également un long historique d'utilisation de la technologie spatiale pour le programme de la navette spatiale américaine et la Station spatiale internationale. Sa technologie TriDAR (Triangulation and LiDAR Automated Rendezvous and Docking Sensor) qui a servi à recevoir des cargaisons à la station spatiale a un grand potentiel pour le marché commercial de l'espace. Le développement d'autres capteurs spatiaux perfectionnés et de systèmes autonomes de navigation

spatiale a mené à un contrat d'exportation en Europe visant la production et la livraison de caméras de localisation pour la mission ExoMars de l'ASE.

Dans les données d'entrevue, Blue Sky Spectroscopy de Lethbridge (Alberta) est un des exemples les plus cités d'application sur la Terre d'une technologie spatiale. Une étude de la documentation parallèle obtenue par l'évaluation a révélé que l'entreprise « avait doublé l'investissement grâce à des contrats de l'Agence spatiale européenne, des partenaires internationaux et des collaborateurs du secteur public pour mettre au point un microscope à térahertz pour le diagnostic du cancer du sein ». Le financement de l'ASC en soutien au chercheur principal canadien de la mission Hershel de l'ASE pour la conception et la mise au point de l'instrument PIRE (le récepteur d'imagerie spectrale et photométrique) a contribué au développement de la technologie et de son application médicale. La technologie permettra aux pathologistes de faire un dépistage d'échantillons de biopsie pour déterminer s'ils présentent une signature cancéreuse avant de passer à d'autres procédures de diagnostic, ce qui réduira le temps et les coûts associés à la détection de cancers.

L'évaluation de la contribution à une croissance économique soutenue de l'application à un contexte terrestre ou spatial de ces innovations technologiques ou d'autres exigerait des recherches approfondies. Elle impliquerait la collaboration des industries spatiales directement participantes et suffisamment de preuves pour attribuer les avantages économiques sous la forme de revenus et d'emplois accrus au financement des programmes de missions d'astronomie spatiale et de missions planétaires pour des contrats de conception, construction et lancement ou des subventions et des contributions pour la recherche spatiale. Bien qu'une telle entreprise dépasse l'ampleur et les ressources disponibles pour la présente évaluation, il s'agit d'une activité nécessaire pour démontrer l'atteinte d'un résultat. Néanmoins, les exemples mentionnés ici ont un potentiel considérable de contribuer à la croissance économique, pourvu que les entreprises restent financièrement viables, ne soient pas fusionnées ou vendues à des compagnies étrangères ou que leurs actifs soient transférés hors du Canada.

Comme nous l'avons noté plus haut, l'étude de cas indique que ce scénario s'est produit à deux reprises. Les activités canadiennes et américaines de la MDA sont maintenant administrées par une entreprise des États-Unis[51]. En novembre 2015, le conglomérat international états-unien Honeywell international a annoncé l'achat[52] du secteur d'activité Matériel et Systèmes spatiaux de COM DEV international pour le fusionner à son secteur d'activité Défense et Espace. Cependant, cet achat n'a pas inclus l'acquisition du secteur Exploration spatiale de COM DEV à Cambridge (Ontario). Ces événements pourraient avoir affecté la croissance économique soutenue du secteur canadien de l'exploration spatiale qui n'a pas cru depuis les cinq dernières années.

Question n° 16 de l'évaluation (efficacité) : Est-ce que le profil de l'exploration spatiale a été rehaussé au Canada et à l'étranger ?

Constatation n° 16 : Les programmes de missions d'astronomie spatiale et de missions planétaires ont rehaussé la réputation du Canada en matière d'exploration spatiale ainsi que sa visibilité pour des partenaires internationaux clés, notamment pour la qualité de ses contributions aux sous-systèmes de

mission et aux instruments scientifiques. Sans une participation aux missions proposées, la visibilité à l'étranger de l'exploration spatiale au Canada pourrait être réduite.

Le personnel de l'ASC, les équipes scientifiques canadiennes et l'industrie spatiale canadiennes ont joué un rôle important dans les prestigieuses missions ML et JWST de la NASA, dans le cadre desquelles les instruments et sous-systèmes APXS et NIRISS-FGS ont rempli ou rempliront des fonctions scientifiques cruciales comme l'on mentionné les deux études cas de l'évaluation. Ces contributions ont rehaussé la réputation du Canada auprès de la NASA d'être un partenaire digne de confiance pour l'exploration spatiale. Parmi les agences spatiales internationales, le secteur spatial canadien a la réputation d'être un partenaire déterminé à produire des instruments scientifiques et des sous-systèmes de grande valeur avec des budgets réduits et dans les délais convenus. Les données d'entrevue confirment que les scientifiques canadiens sont tenus en haute estime par leurs pairs internationaux et sont des membres d'équipes recherchés. Les sentiments globalement positifs exprimés dans les données d'entrevue se retrouvent aussi dans les données de l'enquête en ligne. En effet, 79 % des répondants ont jugé que les répercussions des programmes de missions d'astronomie spatiale et de missions planétaires sur la visibilité du Canada et sa perception sont égales ou supérieures à leurs attentes, en s'appuyant sur des publications, des conférences de presse, des communiqués de presse, des allocutions et des réactions du personnel d'agences spatiales d'autres pays.

Toutefois, la capacité du Canada à répondre aux invitations à participer à des missions spatiales n'a pas toujours été évidente ou rapide. Par exemple, dans le cas de la mission Mars 2020 de la NASA, le gouvernement du Canada a attendu presque la fin du processus de choix d'instruments pour confirmer qu'il n'y participerait pas. Cette nouvelle fut décevante pour les partenaires internationaux et les intervenants du Canada qui avaient assumé le risque de déposer des propositions sans l'appui officiel de l'Agence spatiale canadienne. Les données d'entrevues que nous avons pu recueillir de ce groupe d'intervenants importants étaient révélatrices à cet égard : « dans le meilleur des cas, notre collaboration avec le Canada en science spatiale a été sporadique au cours de la dernière décennie » et « le Canada joua un rôle important, il serait ainsi regrettable si les aptitudes et la capacité développées au cours des dernières années étaient perdues ». Les Canadiens et les partenaires internationaux perçoivent la réputation et la visibilité des programmes d'astronomie spatiale et de missions planétaires comme étant en péril : « on espère profondément une plus grande participation du Canada ».

Au chapitre de la couverture et de l'intérêt médiatiques, 267 articles ont été publiés dans la presse canadienne non spécialisée au sujet des missions astronomiques spatiales du Canada ou de missions auxquelles le Canada a participé, alors que pendant la durée visée par l'évaluation, 460 articles ont été publiés dans la presse non spécialisée d'autres pays. De même, 245 articles ont été publiés +dans la presse canadienne non spécialisée au sujet de la participation du Canada dans des missions planétaires et 376 articles dans la presse non spécialisée d'autres pays.

4.3 Efficience

Cette section présente les constatations liées aux questions d'évaluation de l'efficience : efficiences du processus de mise en œuvre, levier financier, adéquation des ressources et efficacités économiques.

Question n° 17 de l'évaluation (efficience) : Dans quelle mesure le programme est-il efficace pour obtenir des résultats et atteindre les objectifs ?

Constatation no 17 : Le nombre décroissant de MAS et de MP en préparation et en exploitation pendant la période d'évaluation est en proportion du déclin de nouveaux investissements et de certains revers de mission regrettables, mais hors du contrôle des programmes. L'accès continu aux données et les résultats liés à l'objectif de compétences accrues de la communauté scientifique canadienne ont été obtenus à un coût très raisonnable pour le gouvernement du Canada relativement aux coûts globaux des missions assumés par ses partenaires internationaux.

Dans les données d'entrevue, la perception de l'efficience varie considérablement selon le groupe d'intervenants clés. Lors des entrevues, on a demandé aux intervenants de donner une note sur cinq à chacun des deux programmes. Les personnes interviewées à l'interne ont donné pour le rendement la note moyenne de 4,5 pour les missions d'astronomie spatiale et de 3,8 pour les missions planétaires, alors que les personnes de l'extérieur interviewées ont donné une note inférieure de 3 points aux missions planétaires. Du point de vue des bénéficiaires du financement des MAS et des MP, 26 % des répondants ont évalué l'impact de ces programmes sur le développement de nouvelles technologies, d'instruments et la génération de nouvelles connaissances comme étant supérieur à celui de programmes équivalents, alors que 42 % estimaient que le rendement était inférieur à celui de programmes équivalents. Nous résumons plus bas certaines des principales explications tirées des données d'entrevue de ces notes pour l'efficience.

Dans les données d'entrevue à l'interne et à l'externe, on a attribué à l'absence d'un plan stratégique à long terme le processus de prise de décisions ponctuelles et réactives en réponse aux priorités cernées par la communauté scientifique canadienne, aux invitations reçues et aux approbations de missions. Cela a limité la capacité du Canada à élaborer un programme novateur de recherche en exploration spatiale et de prioriser ses missions en conséquence. L'incertitude du financement et le long processus de prise de décisions nécessaire pour l'approbation des missions ont limité la capacité de l'ASC de s'engager dans les missions spatiales proposées et de s'adapter à l'échéancier des agences spatiales partenaires. Cela s'est traduit par des coûts importants pour les partenaires universitaires et industriels qui se positionnent pour des missions à venir, collaborent à des propositions et défendent leur approbation. Il vaut aussi la peine de mentionner qu'il existe des instances où l'ASC s'est engagée envers une mission, comme MATMOS dont les partenaires internationaux se sont retirés, ce qui rendait inutile la contribution du Canada. Et enfin, on perçoit que des manques d'efficience dans l'utilisation des ressources à l'ASC, dans l'industrie et dans les universités se sont accrus parce qu'une plus grande partie des mises à jour technologiques, des études de contribution à des missions, des études de phase 0 et des propositions n'ont pas réussi à obtenir

une approbation de mission, essentiellement à cause de contraintes financières qui ne permettaient pas de s'engager envers des missions.

En contrepartie, les notes d'efficacité plus élevées attribuées par les répondants à l'interne se justifiaient par l'effet de levier qui a augmenté la rentabilité. Avec des investissements plutôt modestes, les programmes de MAS et de MP ont réussi à obtenir un accès à une infrastructure de missions spatiales que le Canada ne pourrait jamais se payer seul. À cet égard, les deux études de cas produites pour la présente évaluation avancent les preuves très détaillées que nous résumons ici par souci de commodité :

- La mission JWST de la NASA a coûté plus de neuf milliards de dollars américains en raison de retards dans le développement, alors que la contribution du gouvernement du Canada (NIRISS-FGS) est évaluée à 214 M$ CAN.
- La mission MSL de la NASA a coûté plus de deux milliards et demie de dollars américains avec une prolongation de la mission, alors que la contribution du gouvernement du Canada (APXS) est évaluée à 20 M$ CAN.

Le Canada reçoit de nombreux avantages en contrepartie de ses investissements plutôt modestes : scientifiques, culturels et même économiques. Les communautés canadiennes de l'astronomie et de planétologie ont la possibilité d'influencer l'orientation de la recherche spatiale, de concevoir et livrer leurs propres instruments scientifiques, de tirer parti de temps d'observation garanti (le cas échéant), et de détenir un accès prioritaire aux données de recherche pendant au moins six mois. Ces avantages non négligeables permettent de maintenir la position d'influence du Canada parmi les chefs de file de la recherche en exploration spatiale, ce qui est une source de fierté et d'inspiration et attire et permet de conserver des personnes hautement qualifiées dans les disciplines des sciences, de la technologie, du génie et des mathématiques essentielles pour une économie canadienne novatrice et productive.

Question n° 18 de l'évaluation (efficience) : Dans quelle mesure a-t-on réduit le plus possible l'utilisation de ressources dans la mise en œuvre et l'exécution du programme ?

Constatation n° 18 : L'utilisation des ressources humaines et financières a été réduite à près de son point le plus bas au cours de l'exercice 2015-2016, ce qui correspond à la baisse considérable d'activités liées au programme et de dépenses. La proportion intégrée des frais généraux pour 2015–16, de 20 %, était élevée par rapport à d'autres programmes du gouvernement du Canada ayant des volets de subventions et de contributions (12 à 17 %).

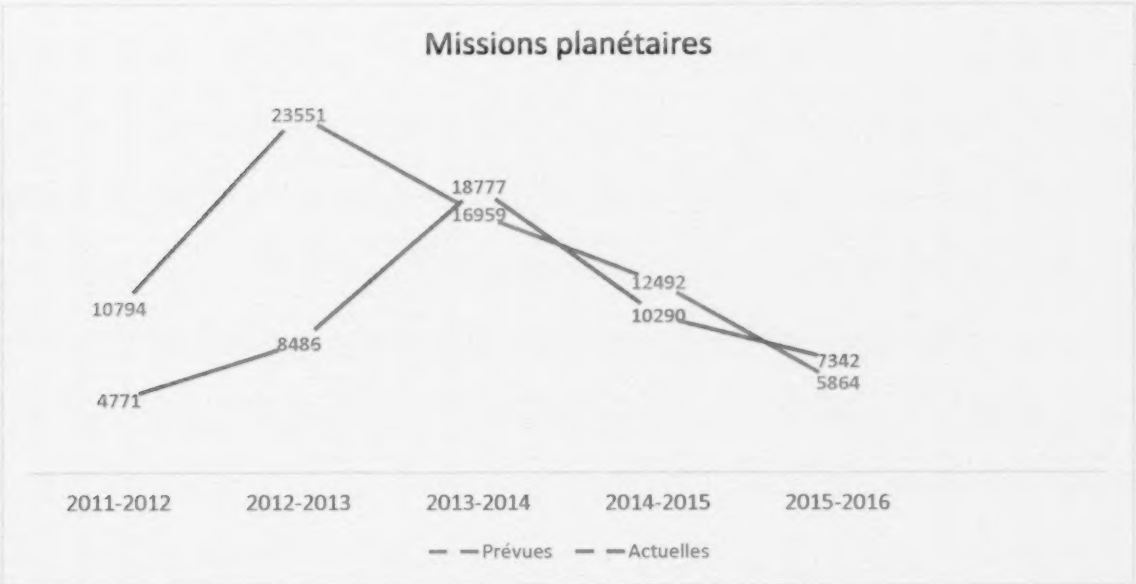
L'évaluation comporte une analyse des écarts entre les dépenses du budget et les dépenses réelles, fondée sur les données financières fournies par la direction des Finances de l'ASC et présentée au tableau 1. Les écarts d'une année à l'autre pour les MAS et les MP sont présentés plus bas dans les figures 2 et 3. Les écarts proprement dits n'ont rien de particulier, mais la tendance vers le bas des estimations budgétaires et des dépenses réelles pour les deux programmes depuis l'exercice 2012-2013 mérite d'être soulignée. Les deux programmes ont presque atteint leurs dépenses les plus basses de 7,3 millions $ pendant l'exercice 2015-2016, et leur effectif le plus petit de 9,5 et 6 ETP pour les MAS et

les MP, respectivement. Les données d'entrevues révèlent que plusieurs membres du personnel avaient déjà été mutés vers d'autres secteurs du Programme d'exploration spatiale. La baisse des dépenses pendant la période visée par l'évaluation peut être attribué à la maturité de quatre missions en cours qui étaient arrivées à la phase opérationnelle ou à la phase de réduction des données de leur cycle de vie, et aux coûts inférieurs associés aux phases de développement de quatre petites missions satellitaires. La mission du JWST avait entraîné des coûts importants pendant la phase de production des instruments NIRISS-FGS, mais ces coûts ont beaucoup diminué après la livraison de la charge utile canadienne en 2012. Le dernier facteur significatif expliquant le déclin des dépenses est l'absence de mission en phase de définition et de conception approuvée pendant la période visée par l'évaluation, comme le montre la figure 2.

Figure 2 : MAS — Dépenses prévues et réelles, en 1000 $ de 2011 à 2016

Source : Données financières fournies par la direction des Finances de l'ASC

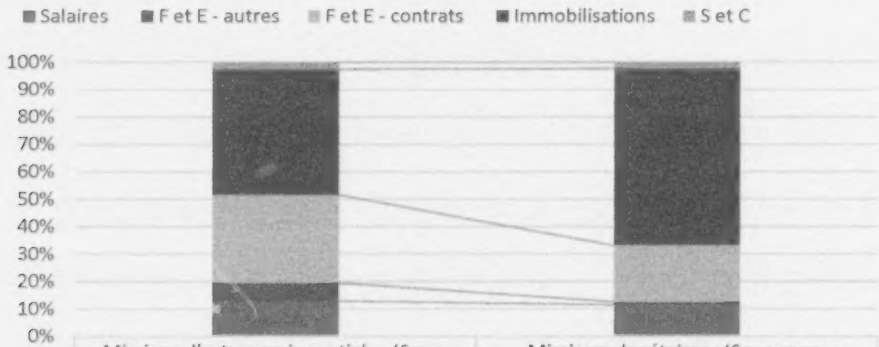
Figure 3 : MP — Dépenses prévues et réelles, en 1000 $ de 2011 à 2016



Source : Données financières fournies par la direction des Finances de l'ASC

La structure des dépenses des MAS et MP illustrée à la figure 4 révèle que les immobilisations et les contrats de F et E étaient les postes les plus importants des deux programmes, même si les proportions étaient différentes, ce qui reflète la nature accréditive des déboursements aux universités et aux partenaires de l'industrie spatiale.

Figure 4 : Distribution des dépenses totales, en 1000 $ de 2011 à 2016



	Missions d'astronomie spatiale : (Sous-sous-programme 1.2.2.1)	Missions planétaires : (Sous-sous-programme 1.2.2.2)
S et C	1569	1146
Immobilisations	28121	32098
F et E - contrats	19620	10142
F et E - autres	4012	556
Salaires	7936	5723

Source : Données financières fournies par la direction des Finances de l'ASC

Nous avons calculé les proportions annuelles des frais généraux pour les MAS et les MP, et les présentons individuellement aux tableaux 2 et 3, et intégrées au tableau 4. Les MAS avaient la deuxième proportion annuelle la plus élevée des frais généraux uniques (25 %) et la plus haute proportion moyenne des frais généraux (20 %). Malgré de très importantes réductions dans le personnel (de 17 à 6 ETP) et la baisse concomitante du fardeau salarial, le déclin le plus marqué dans les coûts réels a entraîné une hausse de la proportion des frais généraux.

Tableau 2 : Frais généraux annuels des MAS de 2011 à 2016

Type de dépenses/Exercice	2011–2012	2012–2013	2013–2014	2014–2015	2015–2016
ETP réels	17,7	16,7	12,0	6,0	6,0
Salaires réels ($)	2 271 000	2 153 000	1 611 000	987 000	914 000
F et E réels — autres ($)	892 000	671 000	743 000	802 000	904 000
Coûts réels $	13 595 000	14 611 000	11 761 000	13 942 000	7 348 000
Proportion des frais généraux	23 %	19 %	20 %	13 %	25 %

Source : Données financières fournies par la direction des Finances de l'ASC

Les MP avaient la plus forte proportion annuelle des frais généraux unique (29 %) et la plus faible proportion moyenne des frais généraux (16 %). Pendant la période visée par l'évaluation, l'effectif n'a pas connu une réduction importante (11,2 à 9,6 ETP), pas plus que le fardeau salarial. Les coûts « F et E réels – autres » des MP étaient considérablement plus faibles que ceux des MAS ce qui, avec une pointe dans les coûts réels en 2013-2014, expliqueraient la proportion beaucoup plus faible des frais généraux.

Tableau 3 : Frais généraux annuels des MP de 2011 à 2016

Type de dépenses/Exercice	2011–2012	2012–2013	2013–2014	2014–2015	2015–2016
ETP réels	11,2	9,9	10,6	9,5	9,6
Salaires réels ($)	1 222 000	1 091 000	1 173 000	1 120 000	1 117 000
F et E réels — autres ($)	154 000	224 000	65 000	59 000	53 000
Coûts réels $	4 771 000	8 486 000	18 777 000	10 290 000	7 342 000
Proportion des frais généraux	29 %	16 %	7 %	11 %	16 %

Source : Données financières fournies par la direction des Finances de l'ASC

Au Tableau 4, on peut clairement voir le déclin global des coûts accréditifs réels commençant a cours de l'exercice 2013-2014 et, en dépit des réductions d'effectifs après cette date, la proportion des frais généraux intégrés à la fin de la période se chiffrait à 20 %. Elle était plus élevée que la proportion de 12 à 17 % des frais généraux d'autres programmes du gouvernement du Canada ayant des volets de subventions et de contributions.

Tableau 4 : Frais généraux annuels intégrés des MAS et MP de 2011 à 2016

Type de dépenses/Exercice	2011–2012	2012–2013	2013–2014	2014–2015	2015–2016
ETP réels	28,9	26,6	22,6	15,5	15,6
Salaires réels ($)	3 493 000	3 244 000	2 784 000	2 107 000	2 031 000
F et E réels — autres ($)	1 046 000	895 000	809 000	862 000	957 000
Coûts réels $	18 366 000	23 460 000	30 555 000	24 363 000	14 728 000
Proportion des frais généraux	25 %	18 %	12 %	12 %	20 %

Source : Données financières fournies par la direction des Finances de l'ASC

Malgré les réductions des effectifs et des coûts, les hausses de la proportion des frais généraux sont révélatrices d'un programme en déclin, car les coûts réels baissent en l'absence de nouvelles approbations de financement. Le niveau actuel des coûts réels des programmes de MAS et de MP aux partenaires universitaires et industriels dans le secteur de l'exploration spatiale est si petit (14,7 M$ en 2015-2016) par rapport aux revenus globaux liés à l'exploration spatiale, qu'il ne pourrait pas servir de mesure de stimulation pour une croissance économique soutenue, sauf au niveau des entreprises individuelles.

5 Conclusions et recommandation

Nous présentons ici les conclusions de l'évaluation fondées sur les constatations et les preuves à l'appui, ainsi que la recommandation proposée pour aborder les problèmes cruciaux cernés dans les conclusions.

5.1 Pertinence

Conclusion 1 : Les programmes de MAS et de MP sont bien harmonisés avec le programme d'innovation du gouvernement, ainsi qu'avec le mandat et les résultats stratégiques de l'ASC. Les programmes de MAS et de MP sont essentiels pour maintenir au Canada un effectif d'astronomes et de scientifiques planétaires de catégorie mondiale qui se consacrent au progrès des connaissances sur l'espace par la recherche scientifique. Or, pendant la période d'évaluation de cinq ans, ils n'ont reçu aucune des approbations de financement nécessaires pour explorer de nouvelles possibilités. Dans ce contexte de ressources limitées, ces programmes peuvent avoir de la difficulté à répondre aux besoins à long terme des astronomes et des planétologues canadiens, ainsi qu'à ceux de l'industrie spatiale et des partenaires internationaux. [Constatations n° 1, 2, 3 et 4]

L'évaluation a constaté que les programmes de MAS et de MP qui développent les capacités canadiennes en exploration spatiale et qui, grâce à la science et à l'innovation technologique, font progresser les connaissances sur l'espace, étaient très pertinents au regard du mandat et des objectifs stratégiques de l'ASC. Les missions d'astronomie spatiale et les missions planétaires actuelles dont le développement ou la phase opérationnelle sont en cours, continueront de répondre aux besoins de leurs communautés scientifiques respectives en leur offrant des opportunités de faire de la recherche en exploration spatiale, d'accéder à des données scientifiques et de contribuer à l'approfondissement des connaissances pendant encore plusieurs années. Toutefois, pendant la période évaluée, il n'existait aucune mission en phase de définition ou de conception susceptible de remplacer l'ensemble de missions actuel au cours des cinq ou dix prochaines années. Étant donné que l'ASC est la seule agence qui offre à la communauté scientifique un accès à des occasions et à des données d'astronomie spatiale, et sans une approbation de mission dans un avenir très proche, les programmes de MAS et de MP risquent donc, assez rapidement, de ne pas pouvoir répondre aux besoins des communautés scientifiques et des partenaires universitaires.

5.2 Efficacité et efficience

Conclusion 2 : Le nombre de projets scientifiques autorisés, en développement ou en exploitation, a satisfait l'objectif révisé à la baisse, relativement aux huit missions en cours, ce qui était la cible pour l'exercice 2012-2013. Ce déclin est attribuable à des revers de mission et à la non-approbation de missions proposées qui exigeaient l'avance d'engagements financiers de la part du gouvernement du Canada. La participation canadienne à des missions spatiales de partenaires internationaux dépend d'une contribution sous forme d'instruments scientifiques, de sous-systèmes ou de composantes connexes. Les missions d'astronomie spatiale et les missions planétaires dirigées par le Canada (c.-à-d. MOST) ou — plus souvent — celles auxquelles il a contribué, comportaient au moins un instrument scientifique ou sous-système. D'ici 2019, les MAS et les MP auront dépassé leur cible, chaque sous-sous-programme

ayant deux instruments scientifiques qui fournissent périodiquement des données à la communauté scientifique canadienne. [Constatations **n°** 5, 6 et 7]

Les attentes en matière de rendement des programmes de MAS et de MP au début de la période de l'évaluation, en 2011, se reflétaient dans le Rapport sur les plans et les priorités 2012-2013 de l'ASC et elles ont été mentionnées dans le Rapport ministériel sur le rendement de 2012-2013. On prévoyait alors que huit missions d'astronomie spatiale et missions planétaires parrainées par l'ASC seraient en cours d'exploitation et fourniraient des données à la communauté scientifique canadienne. L'objectif a été atteint en partie pendant cet exercice. L'évaluation constate (figure 1) que le nombre de missions en cours d'exploitation et transmettant des données avait diminué en raison de la conclusion de plusieurs missions (Herschel, Planck, MOST), la perte de la mission ASTRO-H, les problèmes de qualité des données de la mission NEOSSat et le report du lancement du JWST. Pendant l'exercice 2015-2016, on ne comptait que deux missions opérationnelles contenant des charges utiles canadiennes (MSL-APXS, ASTROSAT-UVIT) et aucune autre mission n'avait été approuvée ou n'était en cours de définition et de conception. Le contexte organisationnel de l'ASC dans lequel fonctionnaient les programmes de MAS et de MP était de plus en plus restreint par le manque de ressources financières causées par la mission du JWST et d'autres priorités de l'ASC, ce qui limitait la flexibilité de la haute direction à approuver d'autres missions.

Conclusion 3 : Les instruments canadiens exploités dans le cadre de missions d'astronomie spatiales et de missions planétaires ont transmis un flux constant d'observations et d'images de qualité et de types variés au fil des ans. Cependant, la mobilisation des équipes scientifiques a parfois été retardée dès le début à cause du manque de financement par subvention et , d'un financement fragmentaire de la recherche scientifique pendant et après les missions. [Constatation **n°** 8]

Malgré l'accent mis sur le mandat de l'ASC pour faire progresser les connaissances sur le Système solaire et l'Univers grâce à des missions d'astronomie spatiale et à des missions planétaires, l'évaluation a constaté que le principe du financement du début à la fin pour la participation d'équipes scientifiques dans les missions spatiales, généralement reconnu comme étant une pratique exemplaire, a été appliqué de manière uniforme. Les commentaires des informateurs clés concernaient généralement la présence ou l'absence de mécanismes de financement appropriés en temps opportun.

> **Recommandation 1 : Le programme devrait élaborer des lignes directrices qui clarifieraient la définition et la portée du soutien scientifique aux missions afin de permettre la continuité du financement en appui à la recherche scientifique, et ce, pendant toutes les phases d'une mission, de la phase de prédéfinition aux activités après l'exploitation.**

Conclusion 4 : On a constaté l'obtention de résultats significatifs dans le cadre des missions du JWST et du MSL, au cours desquelles le gouvernement, des universités et des partenaires de l'industrie spatiale ont collaboré pour construire des instruments scientifiques de haute performance (NIRISS, APXS) et des sous-systèmes critiques (FGS). Cela a permis au secteur canadien de l'exploration spatiale de mieux se

positionner pour tirer profit d'occasions spatiales et de réutiliser son savoir-faire et ses technologies dans des missions spatiales futures qui généreront des découvertes scientifiques. [Constatations n° 12 et 13.]

La recherche en exploration spatiale est une entreprise très risquée dont les rendements sont incertains, et ce, même si elle est couronnée de succès. La perte de l'engin spatial ASTRO-H, les problèmes liés à la qualité des données scientifiques du NEOSSat, ainsi que les annulations et retards inattendus de missions ont entraîné des baisses de rendement et des coûts financiers. Néanmoins, les résultats de l'évaluation quantitative des objectifs étaient conséquents avec le nombre et la taille des MAS et des MP, alors que les résultats de l'évaluation qualitative des objectifs étaient impressionnants. Les deux études de cas de mission démontraient une forte collaboration entre le gouvernement canadien et ses partenaires universitaires et de l'industrie spatiale et, de manière collective, avec les agences spatiales internationales partenaires. Le transfert de savoir-faire et de technologie d'une mission à l'autre a amélioré les compétences et la capacité de ce segment du secteur de l'exploration spatiale canadienne et lui a permis de se positionner pour saisir des occasions spatiales à venir.

Conclusion 5 : L'accès continu aux données et les résultats accrus en matière de compétences pour la communauté scientifique canadienne ont été réalisés à un coût très raisonnable pour le gouvernement du Canada relativement aux coûts globaux des missions pour ses partenaires internationaux. De plus, le profil et la réputation du Canada sur la scène internationale ont été rehaussés par chaque livraison réussie de produits de mission, particulièrement ceux des prestigieuses missions JWST et MSL. Toutefois, le fait qu'aucune mission n'a été approuvée pendant la période visée par l'évaluation a produit des conséquences perceptibles parmi les partenaires canadiens et internationaux, ce qui pourrait nuire à la réputation du Canada comme partenaire de choix en astronomie spatiale et en exploration planétaire. [Constatations nos 11, 15, 16 et 17]

Les constatations de l'évaluation sur la contribution positive des MAS et MP au profil et à la réputation du Canada en matière d'exploration spatiale sont sans équivoque. On a souvent souligné la combinaison de technologies spatiales éprouvées, du savoir-faire scientifique et technique, et l'attitude positive des Canadiens. Reconnus comme partenaires de confiance et collaborateurs fiables de la NASA, l'ASC et ses partenaires ont pu forger de nouveaux partenariats pour entreprendre des missions d'astronomie spatiale et des missions planétaires avec les agences spatiales de plus en plus actives de plusieurs pays, y compris celles du Japon et de l'Inde, ainsi qu'exporter des technologies et des instruments scientifiques éprouvés dans d'autres pays, comme la Pologne et l'Autriche.

Conclusion 6 : Pendant la période visée par l'évaluation, afin de s'ajuster au déclin des activités de mission et à la réduction concomitante des coûts réels, on a considérablement réduit les capacités des programmes de MAS et de MP en termes de coûts réels totales et de budgets d'exploitation et d'entretien. De plus, la cadence irrégulière des programmes de MAS et de MP a généré des difficultés de gestion des ressources humaines et financières pour les partenaires de l'industrie et les chercheurs des universités, ainsi que de l'incertitude parmi les partenaires internationaux quant aux engagements financiers du Canada envers les missions en cours ou proposées. La réputation enviable que s'était forgée le Canada pendant de longues années grâce à ses contributions phares à des projets conjoints internationaux et à

des missions d'exploration spatiale de premier plan pourrait avoir souffert du manque d'investissements au fil des ans. [Constatations n° 17 et 18]

6 Réponse de la haute direction et plan d'action

	RESPONSABILITÉ ORGANISATION/ FONCTION	RÉPONSE DE LA HAUTE DIRECTION	DÉTAILS DU PLAN D'ACTION	ÉCHÉANCES
RECOMMANDATION 1				
Le programme devrait élaborer des lignes directrices qui clarifieraient la définition et la portée du soutien scientifique aux missions afin de permettre la continuité du financement en appui à la recherche scientifique, et ce, pendant toutes les phases d'une mission, de la phase de prédéfinition aux activités après l'exploitation.	Exploration spatiale en collaboration avec le programme d'Utilisation de l'espace, ainsi que la Planification intégrée et les Finances	La haute direction est d'accord avec la recommandation.	Clarifier la définition et la portée du soutien scientifique pendant les diverses phases des missions scientifiques. Préciser les mécanismes appropriés pour financer la recherche scientifique dans les missions d'astronomie spatiale et les missions planétaires pendant toute l'évolution de ces dernières, d'avant la Phase 0 à la Phase F. Cela exigera la clarification de la propriété des données dans le cadre des missions scientifiques. Étudier l'inclusion de plans de gestion scientifique comme produit à livrer dans le Cadre de gestion et de surveillance des investissements (CGSI) afin de définir l'approche et l'établissement des coûts de la recherche scientifique pendant tout le cycle des missions, de la Phase A jusqu'à la réduction et à l'analyse des données en Phase F. L'évaluation de la faisabilité du soutien à la science est bien couverte dans tout le processus de points de contrôle du CGSI.	31 octobre 2018 31 mars 2019 31 mars 2019

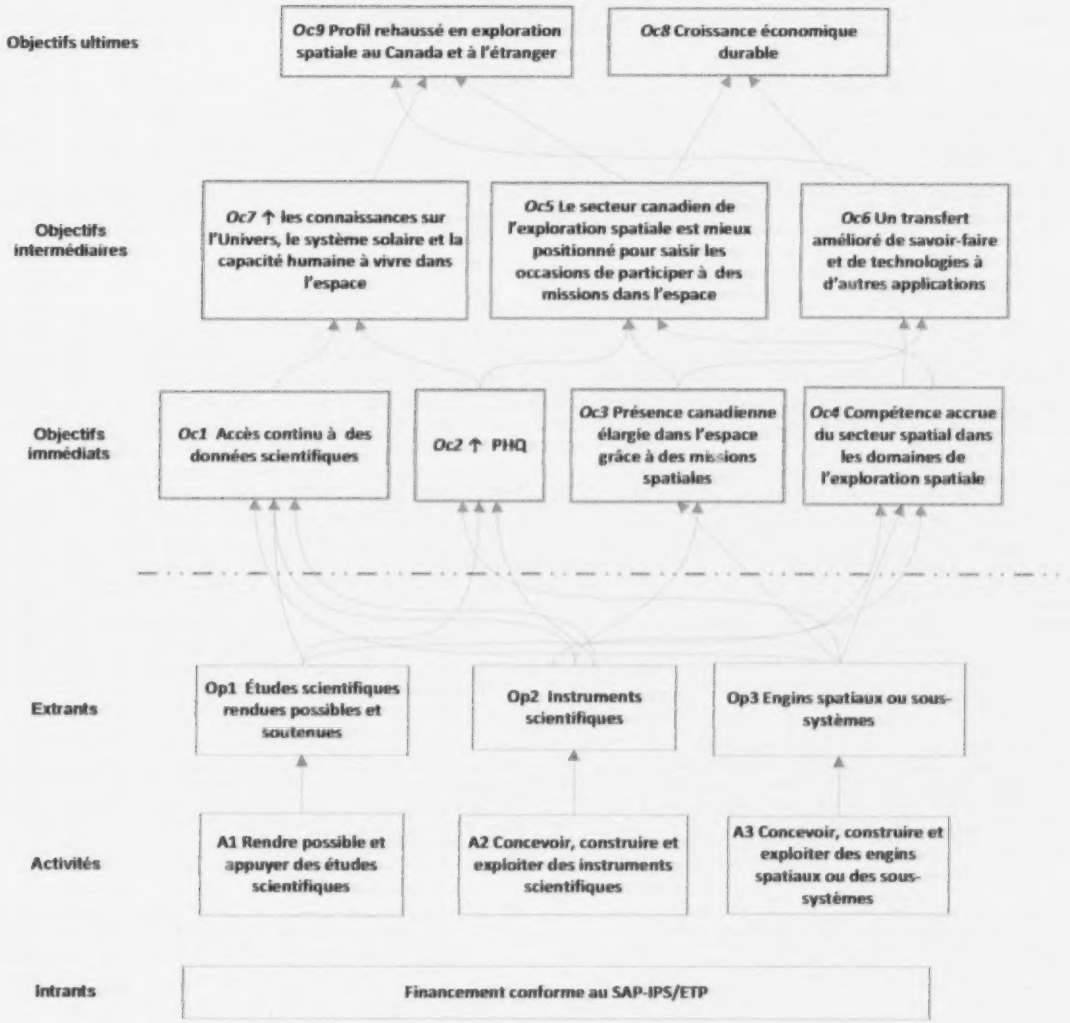
Annexes

Annexe A : Modèle logique pour les MAS et les MP

Modèle logique

Missions d'astronomie spatiale et planétaires

(PAA 1.2.2.1 & 1.2.2.2)



Source: Stratégie de mesure de rendement pour les missions d'astronomie spatiale et planétaire – Mars 2014

Annexe B : Études de cas

Étude de cas : Spectromètre d'analyse des particules alpha et des rayons X (APXS) du Mars Science Lab

Détails de la mission :

Titre de la mission :	***Mars Science Lab — éclaireur Curiosity***
Agence spatiale partenaire	***NASA***
Programme de l'ASC	***Missions planétaires***
État	***En cours***
Durée, dates de début et de fin	***2004 — aujourd'hui***
Financement de l'ASC	***~ 20 millions $ CAN***
Financement de l'agence spatiale partenaire	***~ 2,5 milliards $ US***

Contexte et survol du projet

Le Mars Science Laboratory (MSL) de la NASA fait partie d'une série de missions scientifiques vers Mars faisant appel à la technologie des éclaireurs (*rovers*), dans le cas qui nous intéresse, l'éclaireur Curiosity. Lancé le 26 novembre 2011, le MSL s'est posé avec succès sur Mars le 6 août 2012. La mission a été prolongée deux fois pour des périodes de deux ans. Elle se poursuit et on prévoit que l'éclaireur sera opérationnel jusqu'en août 2018 voire après. Le MSL a été conçu pour évaluer si Mars a déjà pu, ou pourrait encore abriter une vie microbienne. Cela comprend la caractérisation de la géologie, du climat et des conditions ayant pu, dans le passé, soutenir de la vie. On compte dix instruments scientifiques à la fine pointe de la technologie à bord de l'éclaireur Curiosity, dont le Spectromètre d'analyse des particules alpha et des rayons X (APXS) du Canada.

L'éclaireur Curiosity se comporte un géologue robot. Il possède un bras robotique auquel est fixé l'APXS qui analyse la composition chimique de roches et de sols choisis à l'aide de la spectroscopie aux rayons X. Sa mission est de « cartographier les distributions verticales et latérales d'éléments majeurs et mineurs, ainsi que de traces d'éléments, afin d'établir un lien entre les résultats et le contexte géologique, de manière à expliquer la formation, l'évolution et le potentiel biologique de l'environnement au site d'atterrissage »[53]. Le site d'atterrissage du cratère Gale, à proximité du mont Sharp, a été choisi afin d'y étudier les couches sédimentaires qui préservent l'histoire de milliards d'années de conditions climatiques sur la planète[54]. L'APXS a été utilisé pour accomplir une fonction de triage plusieurs fois par semaine. Pour ce faire, la première étape consiste à déplacer l'éclaireur avant de décider s'il y a lieu de forer des roches choisies afin d'en prélever un échantillon à des fins d'analyse à l'aide des autres instruments scientifiques importants. Il a joué un rôle essentiel dans la réussite de la mission[55] grâce à ses mesures de l'abondance élémentaire visant à déceler des traces de sels, comme les chlorures, les bromures et les sulfates (issus du mélange du soufre et de l'oxygène) qui se sont accumulés en dépôts indiquant les lieux où se trouvait de l'eau. Il a ainsi contribué à la majeure partie des grandes découvertes de la mission, y compris la toute

première datation de roches de la surface martienne et la confirmation que la région entourant le mont Sharp avait été un lac d'eau douce, associé à des rivières et à des eaux de surface qui, dans un passé lointain, auraient pu accueillir des formes de vie[56,57].

Cependant, la contribution canadienne au MSL ne se limite pas à l'instrument scientifique APXS. Il s'agit plutôt de *recherche instrumentale*. L'exploitation de cet instrument comprend l'apport de toute une équipe de scientifiques canadiens qui participent quasi quotidiennement aux opérations de la mission et qui analysent les données afin de produire des résultats scientifiques conformes aux objectifs de la mission. Les membres canadiens de l'équipe de l'instrument de recherche APXS incluent le chercheur principal (CP) et deux cochercheurs, ainsi que plusieurs boursiers postdoctoraux et des étudiants des cycles supérieurs. On dépend de leur expertise pour faire fonctionner l'APXS, analyser et interpréter les données produites par l'instrument et communiquer les résultats au reste de l'équipe du MSL.

Outre les recherches avec l'APXS, le Canada appuie également trois scientifiques d'universités canadiennes qui participent à la mission du Mars Science Laboratory. Ces postes sont attribués par la NASA et l'ASC environ tous les trois ans dans le cadre d'un processus concurrentiel ouvert, et les titulaires jouent un rôle équivalent à celui d'un cochercheur de la mission. Un des scientifiques participants travaille surtout avec les données de l'APXS. Les deux autres travaillent avec la ChemCam et la REMS, deux des neuf autres charges utiles de l'éclaireur.

Pertinence

Besoin continu du programme

Le besoin continu du Programme d'exploration planétaire doit être compris dans le contexte de la communauté spatiale canadienne. La force de cette communauté est fondée sur la relation tripartite entre le gouvernement, représenté principalement par l'Agence spatiale canadienne, le secteur de l'industrie spatiale et le milieu universitaire. On compte de petites, moyennes et grandes entreprises au sein de l'industrie spatiale, certaines d'entre elles exploitent des satellites, que ces derniers soient utilisés exclusivement pour l'observation de la Terre, les télécommunications, les sciences spatiales ou la navigation, et d'autres participent à l'exploration spatiale. La communauté spatiale du Canada est également très large en ce qui a trait aux domaines d'expertise qui existent dans les universités et les centres de recherche canadiens, y compris les sciences de la santé humaine et de la vie, la géophysique et l'astronomie. Le mouvement de personnes hautement qualifiées (PHQ) de l'industrie spatiale aux universités et vice-versa a été souligné dans les données d'entrevue.

La communauté de l'exploration planétaire est une composante relativement nouvelle de la communauté spatiale. Si l'on se fie aux recherches de l'ASC et aux données d'entrevue, une seule personne au Canada participait à des missions planétaires au début du millénaire, et un petit nombre d'autres chercheurs menaient des travaux de recherche fondamentale sur la modélisation de la dynamique, l'analyse de météorites et l'étude des cratères d'impact terrestre, des domaines qui n'exigent aucun accès à l'espace[58]. Depuis lors, la communauté s'est étendue et on l'estime à 26 professeurs occupant actuellement des postes de recherche clés dans les meilleures universités canadiennes et qui ont déjà été ou sont

présentement des membres d'équipes scientifiques (cochercheurs) de missions d'exploration planétaire. Les données recueillies lors de l'entrevue collective menée par l'ASC révèlent qu'une grande part de cette croissance a eu lieu pendant la période évaluée, de 2011 à 2016, et qu'elle peut être attribuée aux programmes des scientifiques des participants et des cochercheurs de mission de l'ASC et à d'autres mécanismes permettant à des scientifiques de prendre part à des missions conjointes entreprises avec des agences spatiales partenaires.

Selon tous les bénéficiaires de financement qui ont participé à l'enquête en ligne[59], le besoin d'un financement continu des programmes d'exploration planétaire est soit important ou très important pour leurs recherches. La sélection des scientifiques qui participent aux missions d'exploration planétaire d'agences spatiales internationales est concurrentielle et fondée sur le mérite, mais la contribution financière du gouvernement du Canada par l'entremise de l'ASC est une exigence pour le choix des propositions. Sans ce soutien, les opportunités de participation à titre de cochercheur seraient gravement limitées et les planétologues canadiens devraient se restreindre aux données archivées disponibles sur des plateformes d'accès libre, comme le Planetary Data System de la NASA, pour mener leurs recherches. Selon les données recueillies lors de l'entrevue de groupe de l'ASC, on peut voir que cette éventualité a incité plusieurs éminents scientifiques à discuter ouvertement de la possibilité de quitter le Canada, alors que certains jeunes scientifiques talentueux l'ont déjà fait. Du point de vue de l'industrie, la participation aux missions d'exploration planétaire appuie la compétitivité de l'industrie canadienne sur le marché spatial international en positionnant des entreprises comme MDA à titre de développeur fiable d'instruments d'exploration spatiale opérationnels.

On a également évalué le besoin continu du programme du point de vue des partenaires de l'ASC. Lorsque la NASA a prolongé la mission du MSL en 2014 et que le soutien financier du gouvernement du Canada lié à l'APXS faisait l'objet d'un examen, le chercheur principal de la NASA a écrit : « C'est en raison de notre confiance à l'égard de l'ASC à titre de partenaire fiable et de l'utilité scientifique de l'APXS que nous avons choisi cet instrument comme facteur intégral important pour la réussite de la mission[60]. » L'examen de documents sur les multiples prolongations de la mission a également confirmé que l'APXS était très pertinent pour la NASA et le Jet Propulsion Laboratory qui exploite l'éclaireur Curiosity, compte tenu de sa fonction primordiale pour la mission, la contribution de scientifiques canadiens et l'attente d'un soutien financier continu[61,62,63,64]. Le retrait du soutien de l'APXS lors des phases de prolongation de la mission du MSL aurait été dévastateur pour les opérations scientifiques de l'éclaireur Curiosity, il aurait entraîné pour le Canada une perte de sa crédibilité comme partenaire fiable, il aurait réduit les possibilités de perfectionnement pour d'autres PHQ, et entraîné la perte de travaux de recherche en sciences planétaires.

Efficacité — Résultats

Meilleur positionnement en vue d'occasions spatiales

On s'attend à ce que le Programme d'exploration spatiale, y compris les missions planétaires, contribue au positionnement stratégique du Canada afin d'influer sur des missions d'exploration spatiale et la prise de décisions[65]. L'avis d'offre de participation de la NASA pour le MSL était un appel de propositions

concurrentiel visant à obtenir les instruments scientifiques les plus susceptibles de permettre l'atteinte des objectifs scientifiques de la mission. La proposition canadienne de l'APXS était fondée sur un nouveau partenariat entre les milieux universitaire, industriel et gouvernemental conclu entre le chercheur principal, le professeur Ralf Gellert de l'Université de Guelph, l'entrepreneur principal, McDonald, Dettwiler and Associates (MDA), et l'ASC. La NASA a choisi l'APXS à la fin de 2004 comme projet d'étude mené par un chercheur principal et la contribution financière a été approuvée en avril 2006, pour un coût initial de 9,8 millions $ CAN. L'instrument a été livré à la NASA en 2009, en respectant le budget prévu, bien à l'avance de la date de lancement[66].

En plus de jouer un rôle important dans la préparation des composantes scientifiques de la proposition couronnée de succès, l'Université de Guelph a donné l'orientation scientifique pour la conception, ainsi que le soutien technique pour le développement de l'instrument, a étalonné l'instrument et supervisé sa mise à l'essai, et a dirigé les opérations scientifiques, ce qui englobe la direction de l'exploitation de l'instrument et de l'analyse des données[67]. Cela était un rôle réduit par rapport aux attentes de la NASA, car son processus concurrentiel prévoyait que le chercheur principal assumerait les pouvoirs généraux de l'ampleur du développement de l'instrument. L'autorité décisionnelle du chercheur principal en ce qui a trait à l'ampleur et aux risques ne fait pas partie des pratiques de gestion de projets de l'ASC et l'Agence considère qu'il s'agit d'un risque si une université ne dispose pas du personnel et de l'expérience nécessaires pour gérer un projet spatial. Au moment de la sélection, un seul autre scientifique canadien était inclus dans l'équipe : Iain Campbell Ph. D., aussi de l'Université de Guelph. En plus du rôle de bailleur de fonds, l'ASC a pris la direction de l'ingénierie de l'instrument et des opérations techniques, en liaison directe avec le gestionnaire du projet du MSL. Lors de deux processus de sélection ultérieurs (un concours de mise en valeur des sciences spatiales en 2008 et des sélections concurrentielles de scientifiques participants en 2012 et 2015), d'autres scientifiques canadiens ont été intégrés à l'équipe scientifique du MSL, y compris des chercheurs de l'université McGill, de l'université Brock, de l'université York, de l'Université de l'Ouest de l'Ontario et de l'Université du Nouveau-Brunswick,[68] qui ont tous reçu du financement de l'ASC pour leur participation initiale et continue à la mission[69].

Trois versions antérieures de l'APXS construites par l'Institut Max-Planck de chimie à Mayence (Allemagne) étaient des composantes d'éclaireurs martiens précédents : Pathfinder, Spirit et Opportunity. Encouragé par la MDA, le professeur Gellert a apporté l'APXS au Canada après la fermeture de l'institut allemand, et l'ASC a appuyé le déménagement du scientifique à l'Université de Guelph (UG), où il est devenu le chercheur principal. C'était la première fois que le professeur Gellert participait à un processus de sélection d'un instrument destiné à l'exploration de Mars à titre de chercheur principal. À l'Institut Max-Planck, il a acquis son expertise par la construction et la mise à l'essai d'APXS à titre de chercheur pour l'ancien chercheur principal, parti à la retraite. D'après les données d'entrevue, MDA a joué un rôle primordial dans le positionnement de l'APXS auprès de la NASA et de l'ASC pour la mission du MSL. De plus, ces données ont révélé que jusqu'à cinq ans sont nécessaires pour qu'une entreprise se positionne afin de présenter une proposition pour une telle occasion. La proposition a été soumise avec une lettre d'appui de l'ASC dans laquelle on pouvait lire : « Si la NASA sélectionne l'instrument APXS pour la mission du MSL, l'ASC a l'intention d'envisager le financement de travaux tels que décrits dans la proposition[70] ». MDA est devenu l'entrepreneur principal pour l'APXS ; c'est-à-dire que l'entreprise a développé

l'instrument de 2005 à 2008, puis qu'elle a assuré un soutien technique de réserve de 2011 à 2016. Il faut par ailleurs souligner que la Division spatiale des systèmes d'information de MDA a acheté la compagnie états-unienne qui a construit le bras robotique de l'éclaireur Curiosity, ce qui lui a permis de mieux se positionner en vue de missions futures d'exploration planétaire.

L'opportunité suivante qui est survenue est la mission Mars 2020 de la NASA, conçue pour déceler des traces de vie microscopique ancienne sur la planète. Si l'on se fie aux données recueillies lors de l'entrevue de groupe, la NASA s'était dite intéressée par une éventuelle contribution canadienne à la mission sous forme d'un instrument scientifique ou d'un sous-système technique. L'APXS a été mentionné maintes fois dans le *Science Definition Report* de 2013 et inclus parmi les instruments scientifiques possibles ou la charge utile hypothétique. Selon des données d'entrevue corroborantes obtenues de différents intervenants, l'ASC a reconnu l'importance de cette mission pour la communauté canadienne des sciences planétaires et par l'entremise de recommandations formulées par le Comité consultatif sur l'exploration planétaire. L'ASC a ensuite lancé un processus de demande de propositions concurrentielles, au terme duquel l'équipe de l'APXS de MDA/l'UG a été retenue, et soumis en 2015 à la NASA sa proposition chiffrée d'environ 12 millions de dollars canadiens dans le cadre du processus concurrentiel pour Mars 2020. Toutefois, la proposition a été soumise sans lettre d'appui assurant un soutien financier de l'ASC, car le gouvernement du Canada n'avait pas encore donné son approbation. On a donné au Canada toutes les chances de participer à ce qui pourrait être une mission historique vers Mars susceptible de découvrir des traces de vie sur une autre planète, mais la NASA s'est vue dans l'obligation de choisir un autre instrument scientifique d'un autre pays, dont les capacités sont légèrement différentes. On n'a pas cherché à garantir la position du Canada comme partenaire de préférence de la NASA pour la mission Mars 2020.

Transfert de technologie amélioré

On s'attend à ce que le Programme d'exploration spatiale, y compris les missions planétaires, contribue au transfert de connaissances scientifiques et de savoir-faire à des applications et des usages multiples[71] ; cela inclut le transfert à des applications terrestres et la réutilisation dans le cadre d'autres missions spatiales. Dans le cas de l'APXS, les occasions de prospection géologique sur Terre sont limitées parce que le système a été conçu pour fonctionner dans le vide, dans une atmosphère semblable à celle de Mars, où la pression est égale à un centième de celle de l'atmosphère terrestre. Selon les données d'entrevue, les éléments radioactifs contenus dans l'instrument en empêchent également l'utilisation répandue pour des applications géologiques sur Terre, quoique l'on considère comme étant viables les techniques d'interprétation des données. Les données d'entrevue et de l'enquête en ligne appuient la notion que les technologies spatiales puissent avoir des applications commerciales sur Terre, mais les applications dérivées sont souvent inattendues et elles se matérialisent longtemps après les missions spatiales. Toutefois, l'inverse est plus courant : il arrive souvent que des technologies terrestres soient adaptées aux besoins des scientifiques spatiaux et soumises à un processus de qualification en vue de leur usage pendant des missions. Néanmoins, trois des quatre répondants à l'enquête en ligne associés à l'APXS ont

déclaré que leur expérience leur avait permis de transférer leur expertise nouvellement acquise à d'autres applications sur Terre.

L'histoire de l'APXS illustre clairement les avantages d'une participation continue aux missions d'exploration spatiale avec un même instrument scientifique. Le scientifique principal de la NASA pour la mission du MSL et le chercheur principal canadien de l'APXS ont tous deux commenté la contribution inestimable de l'APXS à l'égard de la continuité des données scientifiques sur la géologie martienne. « Un avantage additionnel de l'APXS est qu'il existe un ensemble de mesures semblables obtenues par d'autres missions martiennes qui constituent une base fiable pour établir des comparaisons régionales[72]. » Pendant l'entrevue de groupe, un des répondants a mentionné que « la valeur des données chimiques de l'APXS est particulièrement évidente lorsqu'elles sont absentes... » Les investissements de l'industrie spatiale dans des technologies spatiales sont fondés sur des analyses de rentabilité permettant de déterminer si les technologies seraient réutilisées lors de missions futures d'exploration spatiale. Les données d'entrevues révèlent que, malgré l'échec de la mission Mars 2020 et la concurrence accrue d'autres instruments scientifiques semblables, il y a toujours beaucoup d'optimisme quant au potentiel de réutilisation de l'APXS lors de missions futures, car il conviendrait à l'étude d'astéroïdes, de comètes et d'autres corps planétaires. Les répondants à l'enquête en ligne qui étaient associés à l'APXS ont également indiqué que leur participation avait eu des répercussions positives sur leur position à réagir à d'autres occasions d'entreprendre des travaux d'exploration planétaire et à les obtenir[73].

Contribution à une croissance économique soutenue

Les attentes relatives à la croissance économique soutenue pour l'industrie spatiale du Canada à laquelle peuvent contribuer la participation canadienne dans l'exploration spatiale et le développement de technologies spatiales novatrices font partie de la justification pour environ une décennie. Les preuves appuyant cette notion ont été difficiles à obtenir lorsqu'on les mesure en termes quantifiables, comme la valeur des contrats subséquents et des ventes commerciales, ainsi que le nombre d'emplois équivalents à temps plein créés pour des PHQ découlant de la commercialisation de la technologie spatiale.

La majeure partie des données disponibles pour cette étude de cas sont anecdotiques, mais elles sont néanmoins convaincantes. La moitié des répondants à l'enquête en ligne qui étaient associés à l'APXS ont reconnu avoir reçu des subventions de recherche subséquentes du CRSNG, du ministère de la Recherche et de l'Innovation de l'Ontario et d'autres programmes de l'ASC, et ce, grâce à leur participation à des missions d'exploration planétaire[74]. Cependant, l'APXS n'a aucune valeur commerciale sur Terre et il n'a entraîné la création d'aucun emploi additionnel, hormis ceux associés à l'exploitation scientifique de l'instrument proprement dit. Si l'on se fie aux données d'entrevue, le Centre d'observation planétaire de l'Université de Guelph, responsable des opérations scientifiques de l'APXS, emploie le chercheur principal, un ingénieur en électronique, un gestionnaire de programme, un boursier postdoctoral et plusieurs étudiants des cycles supérieurs. Si l'on inclut le personnel d'autres universités, de 10 à 15 personnes, au total, travaillent à des contrats connexes.

Pour les partenaires de l'industrie spatiale, l'instabilité du Programme d'exploration planétaire a énormément compliqué la gestion des ressources humaines, des sources de revenus et des ressources

financières, compte tenu du rythme des petites missions planétaires et des grands contrats occasionnels d'exploration spatiale. Néanmoins, à la lumière des données d'entrevue, la valeur d'une participation continue se trouve dans la capacité à rester au fait des tout derniers progrès technologiques, la possibilité d'apports et d'applications dérivées de ces technologies, la capacité d'attirer des personnes hautement qualifiées et la crédibilité accrue qui découle du fait d'avoir construit des instruments scientifiques et des éléments robotiques destinés à la recherche spatiale sur des astéroïdes, Mars et, potentiellement, la Lune.

Rehaussement du profil et de la visibilité du Canada

Le coût de la mission du MSL de la NASA dépasse les 2,5 milliards $ US, y compris les prolongations des opérations de la mission, alors que le soutien de l'APXS par le gouvernement du Canada a coûté un total d'environ 20 millions $ CAN. L'APXS est un petit instrument scientifique peu coûteux, mais il est néanmoins un élément essentiel de la charge utile du MSL. De l'une des dix charges utiles de l'éclaireur, l'APXS donne un rôle de premier plan dans les opérations de la mission du MSL au professeur Gellert, par l'entremise du Groupe scientifique du projet MSL. La mission du MSL, couronnée de succès, s'est avérée très productive dans la génération de données scientifiques sur la composition chimique élémentaire du sol et des roches dans les environs du cratère Gale et, selon le scientifique principal de la NASA, une part importante de cette production peut être attribuée à l'APXS[75]. La réputation du Canada auprès de la NASA à titre de partenaire fiable dans l'exploration spatiale a été améliorée grâce à la contribution des technologies et des scientifiques canadiens à cette mission[76].

L'image emblématique de l'éclaireur Curiosity qui se déplace sur le sol martien a rendu la mission du MSL très visible et reconnaissable pour un public encore plus vaste. L'attention de la NASA et de ses investissements à l'égard des communications publiques ont également rehaussé la visibilité de la contribution du Canada, les services de presse et les médias publics canadiens ayant pu tirer profit de la diffusion de communiqués et d'images de l'agence américaine. Cela était particulièrement évident lors de l'atterrissage de l'éclaireur Curiosity, il y a près de cinq ans. La contribution de l'APXS à l'amélioration du profil international et de la visibilité du Canada en exploration spatiale a également été confirmée par trois des quatre répondants à l'enquête en ligne liés à l'APXS. Selon eux, cette contribution a dépassé les attentes[77]. Cependant, les données d'entrevue suggèrent que l'ASC pourrait avoir fait davantage pour communiquer la nature et l'importance de la contribution de l'APXS au public canadien, tout particulièrement pour inspirer les enfants et les jeunes adultes à faire carrière en science. Des personnes interviewées ont mentionné que les contraintes liées aux ressources ont nui à la capacité de l'ASC de mettre en œuvre une stratégie générale de communication et de sensibilisation. Par exemple, alors que la plupart des autres équipes responsables des instruments à bord du MSL ont des sites Internet actifs pour promouvoir leurs activités, il n'existe toujours aucun site Internet sur l'APXS à l'Université de Guelph.

En 2014, on se demandait si le gouvernement au Canada allait continuer à financer l'APXS pour la prolongation proposée de deux ans. L'étude des documents a révélé qu'une perte de crédibilité et de réputation a été invoquée dans l'analyse de rentabilisation appuyant cette prolongation, ainsi que dans toutes celles qui ont suivi[78]. Plusieurs lettres de soutien de chercheurs de premier plan d'universités canadiennes ont également souligné l'importance de la mission pour faire avancer les connaissances scientifiques sur la planète Mars, le rôle important qu'a joué l'APXS et le risque qui planerait sur la

participation future du Canada à de telles missions si l'on décidait de s'en retirer. On a été déçu de l'incertitude associée au financement de l'APXS par le gouvernement du Canada à chaque prolongation successive de la mission du MSL et de la décision de ne pas appuyer la proposition sur la mission Mars 2020, mais comme l'a déclaré un cadre supérieur de la NASA : « Si des partenariats ne se matérialisent pas avec le Canada ou l'Europe, quelqu'un d'autre comblera ce vide ». En fait, cette décision liée à la mission Mars 2020 a débouché sur l'établissement d'un nouveau concurrent aux États-Unis puisqu'un autre instrument a été choisi pour effectuer des mesures de la composition chimique semblables à celles de l'APXS.

Étude de cas : Le Télescope spatial James Webb – l'Imageur dans le proche infrarouge et spectrographe sans fente (NIRISS) et le Détecteur de guidage de précision (FGS)

Détails de la mission :

Titre de la mission :	***Télescope spatial James Webb***
Agence spatiale partenaire	***NASA***
Programme de l'ASC	***Missions d'astronomie spatiale***
État	***En cours***
Duré, dates de début et de fin	***2004 – aujourd'hui***
Financement de l'ASC	***~ 214 millions $ CAN***
Financement de l'agence spatiale partenaire	***~ 8,8 milliards $ US***

Contexte et survol du projet

L'idée originale de construire un télescope de huit mètres pour le proche infrarouge, à refroidissement passif en orbite haute terrestre a été évoquée pour la première fois en 1989 lors d'un atelier organisé au Space Telescope Science Institute, mais le rapport qui a proposé un tel successeur au Télescope spatial Hubble a été publié en 1994 par l'American Association of Universities in Astronomy[79]. On l'a d'abord appelé le Télescope spatial de prochaine génération avant de le baptiser télescope spatial James Webb (JWST) en 2000, en mémoire de l'administrateur de la NASA responsable du programme Apollo. La mission du JWST est une collaboration internationale menée par la NASA, en partenariat avec l'ASE et l'ASC. En juillet 2007, l'ASC et la NASA ont signé un accord de coopération sur le télescope spatial James Webb, en vertu duquel l'ASC a convenu de construire et de livrer l'instrument NIRISS-FGS et de fournir un soutien fonctionnel aux opérations scientifiques du JWST. Le JWST constitue la mission d'astronomie spatiale la plus ambitieuse et la plus prestigieuse jamais entreprise. Elle est conçue pour étudier « la forme et la composition chimique de l'Univers, l'origine et l'évolution des galaxies et des étoiles, ainsi que la nature de la matière sombre invisible[80] ». Le JWST captera des images dans la portion infrarouge du spectre électromagnétique à l'aide de quatre instruments scientifiques, y compris le Détecteur de guidage de précision (FGS) et l'Imageur dans le proche infrarouge et spectrographe sans fente (NIRISS) canadiens. Les données d'entrevue nous informent que le FGS est une caméra infrarouge réglable très sensible dotée de capacités de poursuite de cible permettant d'orienter le télescope avec une haute précision ; c'est le gouvernail de l'observatoire et il est considéré comme un instrument essentiel à la mission. Le NIRISS est une caméra infrarouge à usage général dotée de capacités uniques pour la détection d'exoplanètes et les études atmosphériques[81]. L'instrument combiné NIRISS-FGS a été livré à la NASA en juillet 2012 et, depuis, il a été intégré au télescope optique et a subi plusieurs séries de tests environnementaux.

La mission du JWST a connu toute une série de dépassements des coûts et de retards, et est devenu l'un des instruments scientifiques les plus coûteux jamais construits à plus de 9 milliards de dollars américains. Le coût global pour la NASA est maintenant évalué à environ 8,8 milliards $ US[82]. En 2004, le

gouvernement du Canada a approuvé la somme de 71,7 millions $ CAN pour la conception préliminaire du projet. Une fois la conception terminée deux ans plus tard, un montant additionnel de 104,2 millions $ CAN a été approuvé, pour un lancement prévu en mai 2013.[83] Cependant, pour diverses raisons, y compris les capteurs infrarouges défectueux fabriqués par un fournisseur étranger et la sous-estimation du temps nécessaire pour l'intégration et la mise à l'essai de la mission, un exercice de replanification de la NASA a entraîné une prolongation du projet de 5,5 ans et la date du lancement est maintenant prévue pour 2018-2019.[84] On estime que le coût global de la contribution du Canada à la mission du JWST a atteint les 214,7 millions $ CAN pour livrer le NIRISS-FGS et en assurer le soutien scientifique jusqu'à la fin de la mission en 2024.

La contribution canadienne à la mission du JWST dépasse largement la conception, le développement et la livraison de deux instruments scientifiques : elle comprend la participation de Canadiens dans différents rôles de la mission, comme scientifiques, analystes de données, historiens et membres du groupe de travail scientifique du JWST. De plus, au moins quatre astronomes canadiens travaillent au Space Telescope Science Institute à Baltimore (Maryland), l'actuel centre des opérations scientifiques du Télescope spatial Hubble et le futur centre des opérations du JWST.

Pertinence

Besoin continu du programme

La mission du JWST correspond parfaitement au mandat et aux résultats stratégiques de l'ASC, tout particulièrement le développement des connaissances scientifiques acquises dans le cadre de projets d'exploration spatiale, ainsi que l'application de nouvelles connaissances et de nouveaux savoir-faire. Cependant, le besoin continu du Programme des missions d'astronomie spatiale devrait être interprété dans le riche contexte de la communauté astronomique du Canada. Un examen rapide du site Internet de la Société canadienne d'astronomie et de sa page sur l'historique de la discipline est révélateur. Il vaut la peine de souligner que la première organisation d'astronomes amateurs du Canada a été fondée en 1867 et s'appelait la Société royale d'astronomie du Canada. La communauté d'astronomie canadienne a connu un essor plus lent que celui de son homologue américaine, mais la construction d'observatoires terrestres a été primordiale pour les recherches scientifiques entreprises et la croissance continue de la communauté. Il convient de souligner les observatoires fédéraux, l'observatoire David-Dunlap de l'Université de Toronto inauguré en 1935 et doté alors du deuxième plus grand réflecteur au monde, le soutien de l'Observatoire de radioastronomie du Conseil national de recherches et, ultérieurement, l'Institut Herzberg d'astrophysique. En 1971, lorsque la Société canadienne d'astronomie a été fondée pour les professionnels, elle a attiré une centaine de membres. Selon les données d'entrevue, on estime aujourd'hui que la communauté d'astronomie compte de 500 à 600 personnes, dont environ 300 astronomes professionnels et étudiants des cycles supérieurs d'universités d'un bout à l'autre du Canada. La communauté d'astronomie canadienne compte parmi les plus influentes de la communauté internationale, si l'on se fie aux mesures bibliométriques standard du rendement et de l'impact scientifiques. Elle se situait au sommet, de 1998 à 2009, parmi tous les pays ayant contribué à des progrès scientifiques dans les domaines de l'astronomie et de l'astrophysique[85].

Tous les bénéficiaires de financement ayant répondu à l'enquête en ligne ont souligné le besoin du financement continu du programme d'astronomie spatiale, en précisant qu'il était important ou très important pour leurs recherches. Ce financement, qui représente une fraction du coût des missions de pointe en astronomie spatiale, est perçu comme essentiel si des scientifiques canadiens doivent jouer un rôle d'importance dans les opérations des missions, tirer profit de la présence d'un instrument scientifique canadien à bord et obtenir du temps d'observation garanti. Ce dernier est réservé aux scientifiques qui font des contributions importantes en composants matériels et logiciels clés, comme les chercheurs principaux des quatre instruments scientifiques à bord du JWST. Du temps d'observation général, 450 heures de temps garanti, ou au moins 5 %, devraient être allouées à la communauté astronomique canadienne[86]. En avril 2017, l'équipe d'allocation du temps garanti du JWST a reçu les propositions d'observation de 20 détenteurs de temps garanti pour les observations du Cycle 1, y compris les projets « Exploration à l'aide du NIRISS de la diversité atmosphérique d'exoplanètes en transit », « Relevé à l'aide du NIRISS de jeunes naines brunes et de planètes libres » et plusieurs autres[87]. L'occasion garantie de pointer le télescope spatial le plus puissant du monde serait impossible pour les astronomes canadiens sans la contribution financière du gouvernement du Canada à la mission du JWST. De plus, d'autres astronomes canadiens, dont des stagiaires postdoctoraux, seront bien positionnés pour que leurs projets soient retenus dans l'appel de propositions réservé aux observateurs généraux, grâce à leur participation, directe ou indirecte, aux équipes scientifiques du NIRISS-FGS et à leur connaissance des capacités du JWST. L'étude de la documentation disponible laisse fortement penser que l'utilisation du temps garanti canadien aura un grand impact pour la communauté d'astronomie du Canada, qui se traduira par la maximisation de l'utilisation du JWST, avancera les connaissances scientifiques et produira possiblement de nouvelles découvertes par des scientifiques canadiens qui rehausseront encore la réputation du Canada dans le domaine de l'astronomie spatiale[88,89].

Comme on l'a fréquemment décrit dans la documentation disponible, mais sans que cela soit confirmé dans des données d'entrevue du point de vue de l'industrie, la participation à la mission du JWST appuie la compétitivité de l'industrie canadienne dans le marché spatial international et crée des emplois hautement spécialisés, des exportations de technologies de pointe et des retombées de la commercialisation[90]. Le besoin continu du programme a été évalué du point de vue de la NASA en 2007, alors que le projet se préparait à une revue de définition préliminaire et que le financement additionnel a été suspendu temporairement. Un soutien soutenu et ininterrompu était perçu comme essentiel à une étape aussi critique du développement et le rôle prépondérant de l'ASC dans le projet du JWST témoignait de l'histoire fructueuse de la coopération entre les deux agences spatiales[91]. Selon les données d'entrevue, quelques années plus tard alors que les retards et les dépassements de coûts laissaient planer une menace d'annulation par le Congrès américain, la participation de partenaires internationaux appuyant l'agence états-unienne semble avoir été utile. Dans la plus récente évaluation fondée sur les données d'entrevue, la participation canadienne a dépassé les attentes de la NASA, non seulement parce que le FGS répondait à toutes les exigences et que la refonte du NIRISS avait été couronnée de succès, mais aussi parce que la contribution de l'ASC a été un « modèle de collaboration ». Il ne fait aucun doute que cela a permis de rehausser la réputation du Canada à titre d'« un des plus précieux partenaires internationaux de la NASA »[92].

Efficacité – Résultats

Un meilleur positionnement pour des occasions spatiales

La contribution canadienne à la mission du JWST est le fruit d'un effort de collaboration entre le gouvernement, représenté par l'ASC et le Conseil national de recherche du Canada (CNRC), les partenaires de l'industrie représentés par l'entrepreneur principal COM DEV Inc. (COM DEV) et des universités d'un bout à l'autre du pays. La composition de l'équipe scientifique du NIRISS-FGS reflète l'attention de l'ASC à la distribution régionale de la participation à de grands projets de l'État et aux contacts généraux avec des partenaires établis[93]. Le chercheur principal du NIRISS-FGS se trouve à l'Université de Montréal et il collabore avec des astronomes et des scientifiques de l'Université de Toronto, de l'Université de l'Alberta, de l'Université Saint Mary's à Halifax, de l'Université d'Ottawa et de l'Institut Herzberg d'astrophysique du CNRC à Victoria, ainsi qu'avec des scientifiques canadiens en Suisse et aux États-Unis[94]. Le financement fourni pour soutenir la participation du chercheur principal a permis de positionner l'Université de Montréal pour attirer des fonds additionnels et créer un institut de recherche sur les exoplanètes qui, à l'automne 2017, commencera à engager un certain nombre d'étudiants et de boursiers, postdoctoraux et autres, notamment pour analyser les données d'observation du NIRISS. Cet institut est bien positionné pour faire des découvertes très importantes comme l'étude de l'atmosphère d'exoplanètes pour y déceler la présence d'eau, d'environnements habitables et, comme l'a souligné une personne interviewée, « pouvoir pointer du doigt un objet dans le ciel et dire qu'il pourrait y avoir de la vie là-haut ! »

Le rôle des partenaires de l'industrie, dans ce cas précis COM DEV, a été de concevoir et de construire le NIRISS-FSG conformément aux exigences et aux directives de l'équipe scientifique canadienne. En novembre 2005, COM DEV a acheté la Division des instruments scientifiques et optiques spatiaux de l'entrepreneur principal original, EMS Technologies Canada Ltd., et c'est à cette entreprise que le contrat principal a été accordé par la suite. En 2009, l'ASC a commandé une évaluation des coûts et de la capacité afin de déterminer si COM DEV pourrait achever la construction et la mise à l'essai du modèle de vol de la Phase D en respectant l'échéancier et les coûts proposés. Il a été déterminé que la proposition de coût de COM DEV était raisonnable et que l'entreprise avait l'expertise ainsi que les compétences de gestion et d'ingénierie à ses installations d'Ottawa, et qu'elle pouvait tirer profit des ressources considérables de ses installations de Cambridge, en Ontario, pour la fabrication et la mise à l'essai des composants optiques[95]. En 2014, la valeur totale du contrat principal était passée de 82,6 millions $ CAN (estimation de 2007) à environ 154 millions $ CAN[96]. Il a fallu plus de temps que prévu pour achever les instruments scientifiques du NIRISS-FGS en raison de retards subis par la NASA, comme des changements dans les exigences relatives à la portée demandée par la NASA, des capteurs infrarouges défectueux livrés par un fournisseur étranger et la nécessité de reprendre toute la conception du NIRISS-FGS un an avant la date d'échéance pour la livraison. COM DEV a embauché au moins une douzaine de personnes hautement qualifiées (PHQ) dans le cadre du projet — et jusqu'à 50 PHQ lors des périodes de pointe de la conception, de la construction et de la mise à l'essai du matériel de vol avant sa livraison à la NASA — qu'elle n'aurait pas autrement employées. Cela a renforcé ses capacités en ressources humaines et l'a positionnée davantage pour tirer profit de produits dérivés potentiels de la technologie qu'elle a construite et livrée, et ce, même si les instruments scientifiques proprement dits appartiennent à l'État[97]. De plus, le fait

d'avoir livré une composante essentielle à la mission pour un projet aussi visible et prestigieux que le JWST a clairement rehaussé sa crédibilité et sa réputation à titre d'entreprise internationale dans le domaine du matériel et des systèmes spatiaux. En février 2016, COM DEV a été achetée par le conglomérat multinational états-unien Honeywell International Inc. qui l'a fusionnée avec son propre secteur Défense et Espace.

En vertu du protocole d'entente conclu avec la NASA, l'ASC devait fournir l'instrument NIRISS-FGS à la NASA. L'ASC a donc géré le contrat avec COM DEV pour construire et livrer l'instrument NIRISS-FGS répondant aux exigences de la NASA, et pour appuyer les activités d'intégration et de mise à l'essai de la NASA dans le cadre de l'intégration et de la mise à l'essai de l'observatoire. De la fin de 2007 à juin 2012, elle avait détaché une personne comme membre de l'équipe de projet dans les installations de COM DEV à Ottawa, en Ontario, pour s'assurer que COM DEV était bien au courant des exigences du projet et qu'elle les respecterait. Le poste n'est plus nécessaire depuis la livraison du matériel de vol à la NASA, mais la responsabilité de supervision est maintenue jusqu'à la fin du déploiement du télescope en orbite[98].

Amélioration du transfert technologique

Le programme canadien d'exploration spatiale, y compris les missions d'astronomie spatiale, devrait contribuer au transfert de connaissances et de savoir scientifiques à différentes applications ou utilisations[99], ce qui inclut le transfert à des applications terrestres et la réutilisation dans d'autres missions spatiales. Dans le cas du JWST, l'industrie s'attendait à ce que sa participation stimule la production de technologies et l'émergence d'occasions d'affaires dérivées et positionne COM DEV à l'échelle mondiale pour de futures collaborations internationales dans le cadre d'explorations spatiales à venir[100]. Les données des entrevues et de l'enquête en ligne indiquent toutefois qu'il n'existait pas d'applications terrestres connues de la technologie, possiblement parce qu'il était encore trop tôt ou parce que les deux instruments scientifiques étaient, dans une trop grande mesure, conçus pour fonctionner sans entretien dans un environnement cryogénique[101,102]. De nouvelles compétences ont été acquises dans une certaine mesure par les scientifiques participants et de futurs outils d'analyse de données et de savoir-faire devraient être développés.

Le positionnement du Canada pour les futures missions d'exploration spatiale a été noté dans les documents fondateurs. La justification du projet JWST est qu'il soutiendrait la capacité du Canada à influencer les processus décisionnels dans les forums internationaux portant sur les missions prioritaires[103]. D'après les données d'entrevue, la NASA souhaitait obtenir du Canada la fonction de guidage du JWST en raison des compétences et de la technologie démontrées dans le passé. Le potentiel de collaboration future avec la NASA et d'autres agences spatiales a été jugé assez élevé étant donné le succès de la livraison du matériel de vol.

Contribution à une croissance économique durable

Les attentes selon lesquelles la participation canadienne à l'exploration spatiale et au développement de technologies spatiales novatrices comme le FGS-NIRISS contribuerait à une croissance économique soutenue pour l'industrie spatiale canadienne ont été incluses comme partie de la justification pour du

financement pour près d'une décennie. Les preuves à l'appui de cette notion se sont révélées difficiles à obtenir sous une forme quantifiable, comme la valeur des contrats subséquents, la valeur des ventes commerciales, le nombre d'emplois équivalents temps plein créés pour des personnes hautement qualifiées (PHQ) résultant de la commercialisation de la technologie spatiale, et ainsi de suite. L'évaluation n'a trouvé aucune preuve d'une croissance économique soutenue acquise par COM DEV à la suite de la construction et de la livraison du matériel spatial NIRISS-FGS ou concomitante avec ceux-ci. Cependant, au moins une douzaine de PHQ ont été employés par COM DEV, et elles appliqueront fort probablement leur expertise et leur savoir-faire en matière de connaissances à d'autres projets liés à l'espace pour Honeywell ou d'autres entreprises spatiales canadiennes. L'Université de Montréal emploiera également des PHQ supplémentaires pour analyser les données de NIRISS et créera ainsi une expertise qui ne serait autrement pas possible. L'ASC accordera également des subventions pour l'analyse des données du JWST en cours de mission, ce qui entraînera la création de plusieurs postes de stagiaires postdoctoraux dans les universités canadiennes. Bien que le maintien et l'attraction de PHQ dans l'industrie et le milieu universitaire soient évidents[104], les perspectives de contribution à une croissance économique soutenue sont indirectes, peu quantifiables et fortement tributaires de la santé de l'industrie spatiale au Canada.

Amélioration du profil et de la visibilité du Canada

Le coût estimatif de la mission du JWST à la NASA s'élève actuellement à 8,8 milliards de dollars américains, tandis qu'à ce jour, le soutien du gouvernement du Canada au NIRISS-FGS d'élève à 214 millions de dollars canadiens. Malgré l'escalade des coûts et les contretemps techniques, l'ASC et la communauté de l'astronomie canadienne ont démontré leur capacité à fournir un élément critique pour l'un des instruments scientifiques les plus prestigieux et les plus complexes jamais construits. Les données des entrevues donnent à penser que le succès de cette entreprise en cours peut être attribué à la collaboration entre le gouvernement, l'industrie et les universités. Les données suggèrent également que le facteur clé n'est pas la force de la technologie de détection optique et infrarouge, laquelle n'est pas exclusive au Canada, mais les connaissances, l'expertise, le savoir-faire et l'effort de collaboration démontrés par les intervenants. Le JWST a bénéficié d'un soutien considérable de la part des communautés scientifique et astronomique du Canada et un des interviewés a suggéré qu'il s'agit d'un « projet national ».

Selon un haut fonctionnaire de la NASA, le NIRISS-FGS pourrait être la contribution à la science spatiale scientifique la plus importante du Canada à ce jour, car « il a amélioré les capacités du télescope » et l'a rendu plus accessible à l'échelle mondiale. La réputation que le Canada semble avoir développée, en plus d'être un modèle de collaboration, c'est qu'il a contribué davantage que ce que l'on pourrait attendre de la somme d'argent disponible à l'investissement. Le JWST a sans aucun doute contribué à la très grande crédibilité du Canada parmi ses partenaires internationaux sur le plan de ce qu'il peut offrir avec les ressources disponibles.

Annexe C : Références

1 Gouvernement du Canada. 1990. « Loi sur l'Agence spatiale canadienne ».

2 Conseil du Trésor du Canada. 2016. « Politique sur les résultats ». Ottawa (ON), gouvernement du Canada.

3 Agence spatiale canadienne. 2013. « Rapport ministériel sur le rendement 2012–2013 ». Saint-Hubert (QC), gouvernement du Canada, p. 60.

4 Agence spatiale canadienne. 2013. « Rapport ministériel sur le rendement 2012–2013 ». Saint-Hubert (QC), gouvernement du Canada, p. 61.

5 Agence spatiale canadienne. 2014. « Performance Measurement Strategy for Space Astronomy Missions and Planetary Missions Program Alignment Architecture ». Saint-Hubert (QC), gouvernement du Canada, p. 22–25.

6 Agence spatiale canadienne. 2014. « État du secteur spatial canadien 2013 ». Saint-Hubert (QC), gouvernement du Canada, p. 20.

7 Agence spatiale canadienne. 2014. « Performance Measurement Strategy for Space Astronomy Missions and Planetary Missions Program Alignment Architecture ». Saint-Hubert (QC) : gouvernement du Canada, p. 14.

8 Agence spatiale canadienne. 2016. « Space Astronomy & Planetary Missions: Report on Performance 2011–2016 ». Saint-Hubert (QC) : gouvernement du Canada.

9 Agence spatiale canadienne. 2012. « Rapport ministériel sur le rendement 2011–2012 ». Saint-Hubert (QC), gouvernement du Canada, Message du ministre.

10 Conseil des sciences, de la technologie et de l'innovation. 2015. « L'état des lieux en 2014 – Le système des sciences, de la technologie et de l'innovation au Canada : Défis et occasions en matière d'innovation au Canada ». Ottawa (ON), gouvernement du Canada, p. 1.

11 Gouvernement du Canada. 2017. « Le budget de 2017 : Bâtir une classe moyenne forte ». Ministère des Finances, p. 7–8.

12 Jenkins, Tom. 2011. « Innovation Canada : le pouvoir d'agir. Examen du soutien fédéral de la recherche-développement – Rapport final du groupe d'experts ». Travaux publics et Services gouvernementaux Canada, p. 2-3.

13 Jenkins, Tom. 2011. « Innovation Canada : le pouvoir d'agir. Examen du soutien fédéral de la recherche-développement – Rapport final du groupe d'experts ». Travaux publics et Services gouvernementaux Canada, p. 7-4–7-5.

14 Industrie Canada. 2012. « Examen de l'aérospatiale vol.2 : Vers de nouveaux sommets : les intérêts et l'avenir du Canada dans l'espace ». Ottawa (ON), gouvernement du Canada, p. 2.

15 Agence spatiale canadienne. 2014. « Cadre de la politique spatiale du Canada ». Saint-Hubert (QC), gouvernement du Canada, p. 12.

16 Industrie Canada. 2007. Réaliser le potentiel des sciences et de la technologie au profit du Canada. Ottawa (ON), gouvernement du Canada, p. 51–86.

17 Industrie Canada. 2014. « Un moment à saisir pour le Canada : aller de l'avant dans le domaine des sciences, de la technologie et de l'innovation 2014 ». Ottawa (ON), gouvernement du Canada, p. iii.

18 Industrie Canada. 2014. « Un moment à saisir pour le Canada : aller de l'avant dans le domaine des sciences, de la technologie et de l'innovation 2014 ». Ottawa (ON), gouvernement du Canada, p. 41.

19 Industrie Canada. 2014. « Un moment à saisir pour le Canada : aller de l'avant dans le domaine des sciences, de la technologie et de l'innovation 2014 ». Ottawa (ON), gouvernement du Canada, p. iii.

20 Gouvernement du Canada. 2015. « Lettre de mandat du ministre de l'Innovation, des Sciences et du Développement économique ». Ottawa (ON), gouvernement du Canada, p. 2.

[21] Gouvernement du Canada. 2015. « Lettre de mandat de la ministre des Sciences ». Ottawa (ON), gouvernement du Canada, p. 2.
[22] Agence spatiale canadienne. 2011. « Rapport sur les plans et les priorités : Budget des dépenses 2011-2012 ». Saint-Hubert (QC), gouvernement du Canada, p. 6.
[23] Agence spatiale canadienne. 2016. « Rapport sur les plans et les priorités 2016–2017 ». Saint-Hubert (QC), gouvernement du Canada, p. 13.
[24] Agence spatiale canadienne. 2011. « Rapport sur les plans et les priorités : Budget des dépenses 2011-2012 ». Saint-Hubert (QC), gouvernement du Canada, p. 32–33.
[25] Agence spatiale canadienne. 2012. « Rapport ministériel sur le rendement 2011–2012 ». Saint-Hubert (QC), gouvernement du Canada, p. 27–28.
[26] Agence spatiale canadienne. 2016. « Rapport sur les plans et les priorités 2016–2017 ». Saint-Hubert (QC), gouvernement du Canada, p. 8–9.
[27] Gouvernement du Canada. « Loi sur l'Agence spatiale canadienne », 16 mars 2012.
[28] Gouvernement du Canada. 1990. *Loi sur l'Agence spatiale canadienne*, article 5(2) b, c, et d, 16 mars 2012, p. 2.
[29] Industrie Canada. 2012. *Examen de l'aérospatiale vol. 2 : Vers de nouveaux sommets : les intérêts et l'avenir du Canada dans l'espace*. Ottawa (ON), gouvernement du Canada, p. 9.
[30] Industrie Canada. 2012. « Examen de l'aérospatiale vol. 2 : Vers de nouveaux sommets : les intérêts et l'avenir du Canada dans l'espace ». Ottawa (ON), gouvernement du Canada, p. 29.
[31] Industrie Canada. 2011. « Innovation Canada : le pouvoir d'agir ». Ottawa (ON), gouvernement du Canada, p. 2-12, 2-14–2-15.
[32] Industrie Canada. 2012. « Examen de l'aérospatiale vol. 2 : Vers de nouveaux sommets : les intérêts et l'avenir du Canada dans l'espace ». Ottawa (ON), gouvernement du Canada.
[33] Conseil des sciences, de la technologie et de l'innovation. 2015. « L'état des lieux en 2014 – Le système des sciences, de la technologie et de l'innovation au Canada : Défis et occasions en matière d'innovation au Canada ». Ottawa (ON), gouvernement du Canada, p. 21.
[34] Industrie Canada. 2011. « Innovation Canada : le pouvoir d'agir ». Ottawa (ON), gouvernement du Canada, p. 7-8–7-9.
[35] Ministère des Finances Canada. 2017. « Le budget de 2017 : Bâtir une classe moyenne forte ». Ottawa (ON), gouvernement du Canada, p. 101.
[36] *National Post*. 16 octobre 2016. « U.S. firm stages 'stealth takeover' of Canada's largest space tech company ».
[37] *PRNewswire*. 4 février 2016. « Honeywell completes acquisition of COM DEV International's space hardware and systems business ».
[38] Agence spatiale canadienne. 2014. « Performance Measurement Strategy for Space Astronomy Missions and Planetary Missions Program Alignment Architecture ». Saint-Hubert (QC) : gouvernement du Canada, p. 20.
[39] Agence spatiale canadienne. 2016. « Space Astronomy & Planetary Missions: Report on Performance 2011–2016 ». Saint-Hubert (QC) : gouvernement du Canada, p. 6.
[40] Agence spatiale canadienne. 2016. « Space Astronomy & Planetary Missions: Report on Performance 2011–2016 ». Saint-Hubert (QC) : gouvernement du Canada, p. 7.
[41] Agence spatiale canadienne. 3 juin 2016. « Space Astronomy Missions Update », p. 4.
[42] Agence spatiale canadienne. 2011. « State of the Canadian Space Sector 2011: Policy and External relations ». Saint-Hubert (QC) : gouvernement du Canada, p. 17.
[43] Agence spatiale canadienne. 2016. « Space Astronomy & Planetary Missions: Report on Performance 2011–2016 ». Saint-Hubert (QC) : gouvernement du Canada, p. 14.
[44] Agence spatiale canadienne. 2014. « Rapport ministériel sur le rendement 2013-2014 ». Saint-Hubert (QC), gouvernement du Canada, p. 49.

[45] Science-Metrix Inc. 2010. « Performance and impact of Canadian research in astronomy and astrophysics: A bibliometric analysis [1998–2009] ». Montréal, Québec, p. i.

[46] Agence spatiale canadienne. 2016. « Space Astronomy & Planetary Missions: Report on Performance 2011–2016 ». Saint-Hubert (QC) : gouvernement du Canada, p. 22.

[47] Agence spatiale canadienne. 2011. « État du secteur spatial canadien 2011 ». Saint-Hubert (QC), gouvernement du Canada, p. 6.

[48] Agence spatiale canadienne. 2016. « État du secteur spatial canadien en 2015 ». Saint-Hubert (QC), gouvernement du Canada, p. 4.

[49] Agence spatiale canadienne. 2014. « État du secteur spatial canadien 2013 ». Saint-Hubert (QC), gouvernement du Canada, p. 15.

[50] Agence spatiale canadienne. 2016. « État du secteur spatial canadien en 2015 ». Saint-Hubert (QC), gouvernement du Canada, p. 22.

[51] National Post. 16 octobre 2016. « U.S. firm stages 'stealth takeover' of Canada's largest space tech company ».

[52] PRNewswire. 4 février 2016. « Honeywell completes acquisition of COM DEV International's space hardware and systems business ».

[53] Ouellet, Alain. 6 octobre 2011) « Chef, Missions d'astronomie et d'exploration planétaire, Agence spatiale canadienne ». p. 11.

[54] Rey, Daniel. 15 avril 2014. « Université Memorial – Directeur p.i., Développement de l'exploration spatiale, Agence spatiale canadienne ».

[55] National Aeronautics and Space Administration. 8 mai 2014. « Réponse à la SMD/Planetary Science Division ».

[56] Étude de cas sur l'APXS.

[57] Rey, Daniel. 15 avril 2014. « Université Memorial – Directeur p.i., Développement de l'exploration spatiale, Agence spatiale canadienne ».

[58] Agence spatiale canadienne. 1990. « Space Science Research in Canada 1998–1999 Report to the 33rd COSPAR Scientific Assembly ».

[59] Résultats descriptifs de l'enquête en ligne.

[60] National Aeronautics and Space Administration. 8 mai 2014. « Réponse à la SMD/Planetary Science Division ».

[61] Agence spatiale canadienne. 29 mai 2014. « Revue de la prolongation des opérations de l'APXS – Résumé de l'évaluation et recommandation ». [Protégé B]

[62] Agence spatiale canadienne. 29 septembre 2016. « Évaluation de la prolongation des opérations de l'APXS – Présentation au SEDMC ».

[63] Agence spatiale canadienne. 25 octobre 2016. « Instrument d'exploration spatiale canadien APXS – Prolongation de la mission 2 ». [Protégé B]

[64] « Prolongation des opérations de l'instrument APXS dans le cadre de la mission du Mars Science Laboratory de la NASA ».

[65] Agence spatiale canadienne. 29 mai 2014. « Revue de la prolongation des opérations de l'APXS – Résumé de l'évaluation et recommandation ». [Protégé B]

[66] Mars Science Laboratory. « APXS on the Mars Science Laboratory ». Site Internet, aucune date indiquée.

[67] Mars Science Laboratory. « The Maple Leaf Returns to Mars: Canada's Science Instrument on Board NASA's Mars Science Laboratory Mission ». Site Internet, aucune date indiquée.

[68] Agence spatiale canadienne. 25 octobre 2016. « Instrument d'exploration spatiale canadien APXS – Prolongation de la mission 2 ». [Protégé B]

[69] Agence spatiale canadienne. 25 octobre 2016. « Instrument d'exploration spatiale canadien APXS – Prolongation de la mission 2 ». [Protégé B]

[70] Sciences et exploration spatiales. « CSA Project Approval Document (PAD)/Document d'Approbation de Project a L'ASC (DAP) », p. 1.
[71] Agence spatiale canadienne. 29 mai 2014. « Revue de la prolongation des opérations de l'APXS – Résumé de l'évaluation et recommandation ». [Protégé B]
[72] National Aeronautics and Space Administration. 8 mai 2014. « Réponse à la SMD/Planetary Science Division », p. 1.
[73] Résultats descriptifs de l'enquête en ligne.
[74] Résultats descriptifs de l'enquête en ligne.
[75] National Aeronautics and Space Administration (NASA). 8 mai 2014. « Réponse à la SMD/Planetary Science Division ».
[76] National Aeronautics and Space Administration (NASA). 8 mai 2014. « Réponse à la SMD/Planetary Science Division ».
[77] Résultats descriptifs de l'enquête en ligne.
[78] Agence spatiale canadienne. 29 mai 2014. « Revue de la prolongation des opérations de l'APXS – Résumé de l'évaluation et recommandation ». [Protégé B]
[79] Agence spatiale canadienne. 12 mai 2013. « Énoncé de projet : le projet du Télescope spatial James Webb (JWST) ». [Protégé B]
[80] Agence spatiale canadienne. 12 mai 2013. « Énoncé de projet : le projet du Télescope spatial James Webb (JWST) », p. 77. [Protégé B]
[81] Agence spatiale canadienne. 27 juin 2013. « Document d'information du CCSP sur le projet du JWST de l'ASC ». [Protégé B]
[82] Agence spatiale canadienne. 12 mai 2013. « Énoncé de projet : le projet du Télescope spatial James Webb (JWST) ». [Protégé B]
[83] Conseil du Trésor du Canada. 6 février 2014. « Approbation définitive révisée du grand projet de l'État (GPE) Télescope spatial James Webb (JWST) ».
[84] Conseil du Trésor du Canada. 6 février 2014. « Approbation définitive révisée du grand projet de l'État (GPE) Télescope spatial James Webb (JWST) ».
[85] Science-Metrix Inc. 2010. « Performance and impact of Canadian research in astronomy and astrophysics: A bibliometric analysis [1998–2009] ». Montréal (QC).
[86] Agence spatiale canadienne. 27 juin 2013. « Document d'information du CCSP sur le projet du JWST de l'ASC ». [Protégé B]
[87] Site Internet contenant de la documentation sur le Télescope spatial James Webb à l'intention des utilisateurs. Visité le 5 août 2017 à l'adresse : https://jwst-docs.stsci.edu/display/JSP/JWST+GTO+Observation+Specifications
[88] Agence spatiale canadienne. 27 juin 2013. « Document d'information du CCSP sur le projet du JWST de l'ASC ». [Protégé B]
[89] Agence spatiale canadienne. 12 mai 2013. « Énoncé de projet : le projet du Télescope spatial James Webb (JWST) ». [Protégé B]
[90] Agence spatiale canadienne. 12 mai 2013. « Énoncé de projet : le projet du Télescope spatial James Webb (JWST) ». [Protégé B]
[91] National Aeronautics and Space Administration (NASA). 9 novembre 2007. Correspondance interne.
[92] National Aeronautics and Space Administration (NASA). 9 novembre 2007. Correspondance interne.
[93] Travaux publics et Services gouvernementaux Canada. 3 mai 2007. « Télescope spatial James Webb – Projet du détecteur de guidage de précision », p. 73.
[94] Travaux publics et Services gouvernementaux Canada. 3 mai 2007. « Télescope spatial James Webb – Projet du détecteur de guidage de précision », p. 73.
[95] Évaluation indépendante du coût et des capacités du projet JWST/FGS. 16 mars 2009). « Rapport final de l'équipe indépendante de revue ».

[96] Agence spatiale canadienne. 12 mai 2013. « Énoncé de projet : le projet du Télescope spatial James Webb (JWST) ». [Protégé B]

[97] Agence spatiale canadienne. 12 mai 2013. « Énoncé de projet : le projet du Télescope spatial James Webb (JWST) ». [Protégé B]

[98] Agence spatiale canadienne. 12 mai 2013. « Énoncé de projet : le projet du Télescope spatial James Webb (JWST) ». [Protégé B]

[99] Agence spatiale canadienne. Mai 2013. « Project Brief: James Webb Space Telescope (JWST) Project ». [Protégé B]

[100] Agence spatiale canadienne. 12 mai 2013. « Project Brief: James Webb Space Telescope (JWST) Project » . [Protégé B]

[101] « Evaluation of the CSA's Science Astronomy Missions and Planetary Missions Programs », Jason Rooney Notes.

[102] Résultats descriptifs de l'enquête en ligne.

[103] Agence spatiale canadienne. 12 mai 2013. « Project Brief: James Webb Space Telescope (JWST) Project ». [Protégé B]

[104] Agence spatiale canadienne. 12 mai 2013. « Project Brief: James Webb Space Telescope (JWST) Project ». [Protégé B]